

Periodical Part, Published Version

**Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.)**

## **Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2015**

BAWForschungskompodium

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101767>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

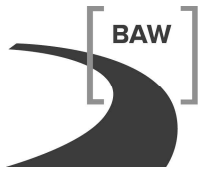
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2016): Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2015. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWForschungskompodium).

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

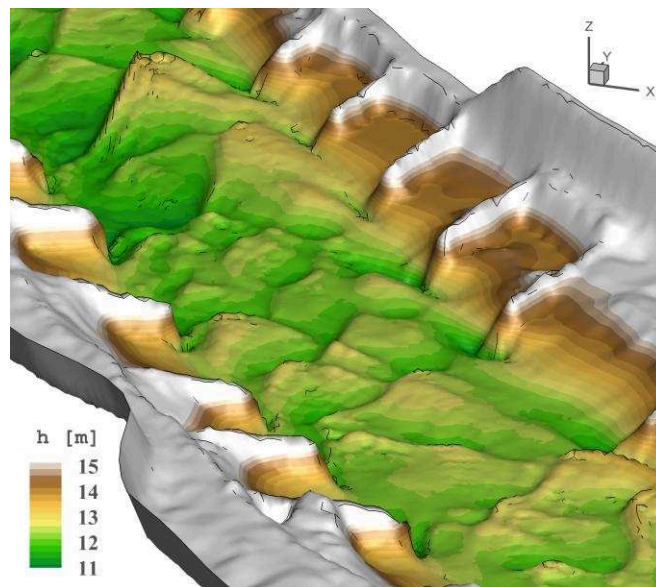
Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





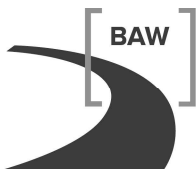
**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen



## **Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2015**

**Titelbild:** *Dreidimensionale 1:10 überhöhte Darstellung der Dünen nach 126 h numerischer Simulation (FuE-Vorhaben A39530570001)*





## Vorwort

Mit rund 100 aktiven Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE-Vorhaben) im Jahr 2015 hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) als technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde dazu beigetragen, Wissenslücken im Verkehrswasserbau zu schließen und dabei sichere, praxisnahe, zukunftsweisende und kostengünstige Lösungen zu entwickeln.

Die BAW betreibt angewandte, praxisorientierte Forschung im Sinne einer Ressortforschung als originäre Aufgabe. Die Ressortforschung ist darauf gerichtet, Entscheidungshilfen zur sachgemäßen Erfüllung der verkehrswasserbaulichen Fachaufgaben der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) und des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zu entwickeln.

Dem Ziel eines engen Bezugs zwischen der Ressortforschung einerseits und der praktischen Anwendung andererseits wird dadurch Genüge getan, dass die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der BAW sowohl Forschungs- und Entwicklungsvorhaben als auch Projektaufträge (Gutachten und Beratung) für die WSV betreuen und bearbeiten. Diese Verzahnung trägt zur besonderen fachwissenschaftlichen Kompetenz der BAW bei und gewährleistet die schnelle Nutzung neuer Erkenntnisse.

Die verkehrswasserbauliche Forschung der BAW wird auf den Gebieten der Bautechnik, der Geotechnik und des Wasserbaus im Binnen- und Küstenbereich wahrgenommen. Alle vier Fachbereiche bearbeiten in etwa gleich viele FuE-Vorhaben, in zunehmendem Maße auch fachübergreifend. Mit Bezug zu dem in 2015 verabschiedeten Forschungsprogramm Verkehrswasserbau der BAW, „Kompetenz für die Wasserstraßen - Heute und in Zukunft“ gliedert sich die Forschung der BAW in die Forschungsbereiche: Infrastruktur, Mobilität und Umwelt. Von den Aufwänden für diese Forschungsbereiche an der gesamten Forschungsleistung entfielen im Jahr 2015 rund 59 % auf Infrastruktur, 10 % auf Mobilität und 31 % auf Umwelt.

Seit dem Jahr 2011 konnten die Forschungsleistungen der BAW deutlich ausgebaut werden. Mit der Haushalts-Titelgruppe „Forschung und Entwicklung für die Wasserstraßen“ stehen Forschungsgelder für Personal- und Sachausgaben zur Verfügung. Für die Personalmittel können ca. 40 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zeitlich befristet eingestellt werden. Viele von ihnen schließen ihre Forschungsarbeit mit einer Promotion ab. Die Sachmittel belaufen sich auf jährlich ca. 2,5 Mio. €, die für Aufträge an bzw. Kooperationen mit Universitäten, Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Ingenieurbüros auf nationaler und internationaler Ebene eingesetzt werden.

Nach einer Vorbereitungszeit von ca. drei Jahren wurde Anfang 2016 das zunächst auf vier Jahre (2016-2019) angelegte BMVI-Forschungsprogramm „Wissen – Können - Handeln“ gestartet, innerhalb dessen die 7 Ressort(forschungs)einrichtungen des BMVI im Sinne eines Expertennetzwerks gleiche bzw. ähnliche Fragestellungen verkehrsträger-übergreifend bearbeiten. Hierzu werden zusätzliche Ressourcen bereitgestellt, von denen auch die BAW profitiert und damit ihre Forschungsaktivitäten weiter ausbauen kann.

Das vorliegende Forschungskompodium 2015 gibt einen vollständigen Überblick über die abgeschlossenen, laufenden und neu begonnenen Forschungsaktivitäten der BAW, dargestellt in Form von Kurzberichten.

Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann  
Leiter der BAW

Dipl.-Ing. Claus Kunz  
Forschungsbeauftragter der BAW





## Inhaltsverzeichnis

### I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2015

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich <sup>1)</sup>	Seite
Ermüdungssicherheit vollverschlossener Seile	A39510170001	B	I	1
Verwendung von Acrylatgelen und gelartigen Produkten für Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbauwerken im Verkehrswasserbau	A39510370005	B	U	4
Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen	A39510370009	B	I	7
Parameter für Stoffgesetze bei FE-Berechnungen	A39520205613	G	I	10
Modellierung des Tragverhaltens von Verpressankern in Sand	A39520270003	G	I	12
Entwicklung des Zustands von Deckwerken bei Absenkung des technischen Standards	A39520470004	G	I	15
Numerische Simulation von hydraulisch induziertem Sedimenttransport in Erdbauwerken	A39520470005	G	I	18
Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen	A39520570002	G	I	21
Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen	A39530110036	W	I	24
Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau	A39530110064	W	I	27
Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes	A39530170001	W	M	31
Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen	A39530170003	W	I	35
Wartezeiten vor Engstellen	A39530410036	W	M	38
Weiterentwicklung der Methoden zur Analyse von Simulationsergebnissen	A39550370200	KW	M	40
Verbesserung von Methoden und Verfahren der BAW zur Entwicklung und belastbaren Beurteilung von Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems	A39550370211	KW	U	43
Schaffung von tidebeeinflussten Marschen an der Tideelbe zur Verbesserung des physikalisch-biologischen Systems	A39550370214	KW	U	47

## II. Laufende FuE-Vorhaben in 2015

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich <sup>1)</sup>	Seite
Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke (SiBeWa)	A39510070001	B	I	49
Entwicklung eines Erhaltungsmanagementsystems für die WSV (EMS-WSV)	A39510070501	B	I	52
Ermittlung Kräfte bei Ankerwurf auf Kreuzungsbauwerke	A39510110178	B	I	55
Zwangsbeanspruchung bei dicken, gerissenen Stahlbetonquerschnitten	A39510170002	B	I	58
Bemessungskonzept für Wasserbauwerke auf Erdbeben	A39510170003	B	I	61
Entwicklung eines Verkehrslastmodells für typische Brücken der WSV	A39510170004	B	I	65
Entwicklung eines Ingenieurmodells zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit schubunbewehrter Stahlbetonquerschnitte bestehender Wasserbauwerke	A39510170005	B	I	68
Korrosionsschutz von Stahl in Beton - Untersuchungen zum Kathodenschutz der Straßenbrücke B500 über den Rhein bei Iffezheim	A39510270002	B	I	71
Korrosionseigenschaften von Spundwandstählen	A39510270003	B	I	75
Materialkombinationen für das System Laufrad/Laufschiene	A39510270004	B	I	79
Einfluss von Korrosion auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlwasserbaukonstruktionen	A39510270005	B	I	81
Korrosionsschutzuntersuchungen – Vergleich Naturauslagerung zu Labor	A39510270006	B	I	84
Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis der Tragfähigkeit von Schlauchwehrmembranen	A39510270007	B	I	87
Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe	A39510308099	B	I	90
Instandsetzungssysteme für alte Wasserbauwerke	A39510310127	B	I	93
Injektion Vorsatzschale	A39510310234	B	I	96
Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken	A39510310240	B	I	99
Messverfahren Hydratationswärme	A39510370004	B	I	103
Ertüchtigung der Bewegungsfugen von Massivbauwerken im Verkehrswasserbau	A39510370006	B	I	106
Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung	A39510370008	B	I	109
Textilbewehrte Mörtel für die Instandsetzung von Wasserbauwerken	A39510370010	B	I	112
Instandsetzung von Schleusenanlagen unter Betrieb (IuB)	A3950370011	B	I	114
Energetische Optimierung der WSV-Gebäude	A39510470001	B	U	117

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich <sup>η</sup>	Seite
Bruch- und Verformungsverhalten von rutschgefährdeten Böschungen unter Berücksichtigung des Dreiphasensystems	A39520210001	G	I	120
Böden unter Stoßbelastung	A39520210014	G	I	123
Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken	A39520210045	G	I	127
Hydraulischer Grundbruch unter unterströmten Bauwerken mit luftseitigen Auflastfilter	A39520370001	G	I	131
Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser	A39520370002	G	U	135
Kolmation als Schlüsselgröße der Wechselwirkung Oberflächenwasser – Grundwasser	A39520370003	G	U	138
Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke	A39520410006	G	I	142
Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung	A39520410076	G	I	145
Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen – Quantifizierung ihrer Belastbarkeit und Möglichkeiten ihrer Anwendung an Binnenwasserstraßen	A39520410151	G	U	148
Filterstabilität grober Gesteinskörnungen	A39520470001	G	I	151
Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit	A39520470002	G	U	155
Erosion von Dichtungstonen und bindigen Böden unter Strömungsbelastung	A39520470003	G	I	158
Bemessung korrodierter Stahlspundwände im Wasserbau	A39550110158	KG	I	161
Deckwerksanalyse mit der Distinct Element Method (DEM)	A39550170270	KG	I	164
Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen	A39550170318	KG	I	168
Störung des Baugrundes durch Kampfmittelsondierungen	A39550170362	KG	I	171
Bestimmung des Tragverhaltens von offenen Stahlrohrpfählen	A39550170378	KG	I	174
Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen	A39530170002	W	U	177
Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen	A39530170004	W	U	181
Untersuchungen zur Herstellung bzw. Verbesserung der Sedimentdurchgängigkeit an der Staustufe Iffezheim	A39530170005	W	I	185
Hydraulische Wirkung von Stromregulierungsbauwerken	A39530210077	W	I	188
Effizienz- und Genauigkeitssteigerung der Modellierung der Hydrodynamik der Flüsse mit einem kombinierten Multigrid- und Subgrid-Ansatz	A39530270002	W	I	191
Entwicklung eines vereinfachten Füllsystems für Sparschleusen	A39530370002	W	I	195

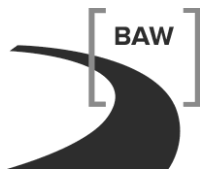
Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich <sup>η</sup>	Seite
Koordinierte Bewirtschaftung von Staustufenketten – Modellierung und Betrieb	A39530370003	W	I	198
Entwicklung von Verfahrensweisen zur Simulation bewegter Objekte mit OpenFOAM	A39530370004	W	M	202
Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle	A39530410038	W	I	205
Erweiterung des Binnenschiffsführungssimulators um die Berechnung schiffsinduzierter Wellen und Verbesserung des fahrdynamischen Modells	A39530470003	W	M	209
Integration mehrdimensionaler Modelle in die GBBSOft	A39530470004	W	I	213
Untersuchungen zur Sohl- und Uferbeanspruchung aus Schlagflächenantrieben	A39530470005		I	215
Modellierung des „human-factor“ bei der Fahrrinnenbemessung	A39530470006	W	M	219
Numerische Modellierung von Transportkörpern (Dünen) in Binnenwasserstraßen	A39530570001	W	I	223
Evaluierung und Adaptierung der SPH-Methode für wasserbauliche Fragestellungen an Bundeswasserstraßen	A39530570002	W	I	227
Zukunftskonzept WADABA	A39540070004	Z	I	231
Datenmanagement und Qualitätssicherung im Verkehrswasserbau	A39540700005	Z	I	234
Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiff-fahrtsstraße - Schiffsdynamik	A39550210055	KW	M	237
Schiffsführungssimulation der Revierfahrt (SFS-R)	A39550270132	KW	M	240
Numerische Berechnung der Schiffshydrodynamik und Manövrierfähigkeit im Flachwasser (SHD-F)	A39550270133	KW	M	244
Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschifffahrtsstraßen	A39550270141	KW	I	248
Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschifffahrtsstraßen	A39550270142	KW	U	252
Berücksichtigung von beweglichen oder fixen Strukturen (Schiffe) an der freien Wasseroberfläche im hydrodynamisch numerischen Modell UnTRIM	A39550270149	KW	M	255
Feststofftransport in Ästuaren	A39550270150	KW	U	258
Modulares System für Schelfmeere und Küsten (MOSSCO)	A39550270155	KW	U	261
Historische Systemzustände des Weser-Ästuars (HIWEST)	A39550270168	KW	U	264
Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserastuar - MorphoWeser	A39550270223	KW	U	266
Verbesserung der Validität und der Prognosefähigkeit des morphodynamischen Verfahrens SediMorph – Phase 2	A39550370178	KW	U	269

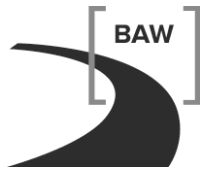
Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich <sup>1)</sup>	Seite
Interaktion von Größen des Sedimenttransports und der Wasserqualität in dreidimensionalen Ästuarmodellen	A39550370190	KW	U	272
Resilience-Increasing Strategies for Coasts - toolKIT (RISC-KIT)	A39550370213	KW	I	275
Integration D-Flow	A39550370221	KW	M	279
RichWPS - Effizientere Nutzung von Geodaten mit Web Processing Service	A39550670201	KFKI	I	283

### III. Neue FuE-Vorhaben in 2015

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich <sup>1)</sup>	Seite
Herstellung von Dränbetonpfählen	A39520270004	G	I	287
Ermittlung charakteristischer Kennwerte in veränderlich festen Gesteinen unter Berücksichtigung des Porenwasserdrucks	A39520270005	G	I	290
Festigkeiten nichtbindiger Böden	A39550170390	KG	I	293
Auswirkung der Zugabe von Dotationswasser und Sonderbauwerken auf die Passierbarkeit von Fischaufstiegesanlagen	A39530170006	W	U	296
Modellierung aufwärtsgerichteter Fischwanderung auf Basis der „Eulerian-Lagrangian-agent method“	A39530170007	W	U	300
EU-Vorhaben Prominent / Horizon 2020	A39530470007	W	U	303
Entwicklung eines impliziten numerischen Verfahrens zur Langfristsimulation der Hydro- und Morphodynamik in Fließgewässern	A39530570004	W	I	305
Maßstabseffekte (MSE)	A39550270174	KW	M	307
Vorstudien zur Entwicklung eines rheologischen Moduls für UnTRIM	A39550370223	KW	U	310
Deutsches Küstenmodell	A39550370227	KW	U	313
Ein 3D biogeochemischen Modell für die Tideelbe	A39550370228	KW	U	316
Verbundprojekt MudEstuary Die Beeinflussung der Dynamik der Tide-ästuare durch Flüssigschlick Teilprojekt MudEstuary_B: Numerische Simulation des Emsästuars KFKI Forschungsvorhaben, gefördert durch das BMBF (Förderkennzeichen: 03KIS113)	A39550370235	KW	I	319
Projekt FWII: Early Dike, Vorhaben: Nutzung der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland zur Kommunikation - Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN	A39550670403	KFKI	I	323

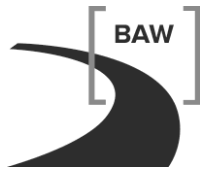
- 1) I: Infrastruktur  
M: Mobilität  
U: Umwelt





## **I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2015**





## **Ermüdungssicherheit vollverschlossener Seile**

**Netzplan-Nr.:** A39510170001

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. R. Ehmann, Dipl.-Ing. M. Schmidmeier, Abteilung Bautechnik,  
Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** rainer.ehmann@baw.de, michael.schmidmeier@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Seile werden im Brückenbau häufig bei Fuß- und Radwegbrücken eingesetzt, bei denen Ermüdungsbeanspruchungen keine große Bedeutung haben und vernachlässigt werden können. Durch die meist kleinen Durchmesser spielen Wechselbeanspruchungen aus Wind keine Rolle und Wechselbeanspruchungen aus Verkehr sind unbedeutend und können unberücksichtigt bleiben. Bei Großbrücken wie Hänge- und Schrägkabelbrücken werden planmäßig Dämpfungsmaßnahmen vorgesehen, die bei kleineren Straßenbrücken wie Stabbogenbrücken und Netzwerkbogenbrücken unerwünscht sind. Allerdings können bei diesen Straßenbrücken erhebliche, zur Ermüdung führende Wechselbeanspruchungen aus Verkehr und Wind auftreten. Für eine Bewertung der auftretenden Ermüdungsbeanspruchungen von vollverschlossenen Spiralseilen fehlen in den Normen derzeit die notwendigen Vorgaben wie Lastannahmen und Nachweisformate bzw. materialtechnische Kennwerte.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die im Jahr 1991 gebaute Gelmer Brücke über den DEK ist eine Stabbogenbrücke mit Rundstahlhängern. Nach nur 15 Jahren Standzeit wurden bei einer Brückenprüfung Anrisse an den geschweißten Hängeranschlüssen festgestellt, die Anlass für eine Sanierung sind. Auch eine günstigere, nach neuesten Regeln gestaltete Hängeranschlussausbildung bietet für die Zukunft keine Gewähr für ein zuverlässiges Unterbinden künftiger Schäden, da die Anrisse mit großer Wahrscheinlichkeit von einem mutwilligen Aufschaukeln (menscheninduzierte Schwingungen) herrühren, was bei einer Eigenfrequenz von 3,7 Hz leicht möglich ist. Nur durch den Einsatz von Seilen ist hier eine signifikante Anhebung der Eigenfrequenz möglich, so dass damit das Handaufschaukeln unterbunden werden kann. Hierfür fehlt jedoch – wie zuvor erläutert – der Nachweis gegen Ermüdung aus Verkehr. Die Sanierung wurde auf Wunsch der BAW verschoben, um die Versuchsergebnisse abzuwarten. Derartige Sanierungen sind auch noch bei weiteren Brückenbauwerken zu erwarten. Bei positiven Versuchsergebnissen ist künftig auch für den Neubau von Stabbogenbrücken oder Netzwerkbogenbrücken der abgesicherte Einsatz von Seilen möglich.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Erarbeiten von Nachweisformaten für den rechnerischen Nachweis der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen unter Biegung und die versuchstechnische Ermittlung einer zugehörigen Kerbgruppe für gängige Seildurchmesser wie sie für WSV-Brücken zum Einsatz kommen könnten.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Vollverschlossene Seile stellen ein insgesamt äußerst komplexes Tragwerkselement dar. Der Aufbau eines solchen Seils besteht aus einer Vielzahl an einzelnen Rund- und Formdrähten, die wendelförmig in mehreren Lagen über einem Kerndraht übereinander „geschlagen“ werden. Durch das Aufbringen von Zugkräften entstehen im Seilinneren verschiedenste Drahtbeanspruchungen (Zug, Biegung, Torsion und Querdruk). Zudem finden unter wechselnden Längs Kräften auch Relativbewegungen der Einzeldrähte untereinander statt, die zu Abrieb und Verschleiß der Drähte führen. Da eine rechnerische Abbildung dieses Tragverhaltens nach wie vor nur bedingt möglich ist, stellen Bauteilversuche die einzige Möglichkeit dar, das reale Trag- und Ermüdungsverhalten von Seilen zu beurteilen.

Vom Ingenieurbüro Dr. Schütz Ingenieure, Kempten, das die Untersuchungen auch fachwissenschaftlich betreut und auswertet, wurden dazu zwei Versuchsreihen konzipiert. Zum Einsatz kamen Seile mit verschiedenen Durchmessern von insgesamt zwei Seilherstellern. Die verwendeten Seilstärken de-

cken dabei den erforderlichen Tragfähigkeitsbereich von Hängern in „üblichen“ Bogenbrücken ab (21 bis 45 mm Durchmesser). Die Versuchsseile besitzen jeweils eine Länge von rund 5 m. Die Seile erfahren in den Versuchen eine kombinierte Wechselbelastung aus Normalkraft und Biegung unter verschiedenen Beanspruchungsniveaus und Beanspruchungsarten („statische“ und „dynamische“ Biegung, Biegung in Kombination mit veränderlicher Normalkraft, etc.).

Die erste Versuchsreihe an der TU München umfasste acht Bauteilversuche und konnte im April 2013 abgeschlossen werden. Im Rahmen der zweiten Versuchsreihe, die an der TU Braunschweig durchgeführt und im Juli 2014 beendet wurde, erfolgte eine Prüfung von insgesamt 10 Seilen. Bild 1 zeigt die beiden Versuchsstände.



*Bild 1: Versuchsstände an den MPA der TU München (links) und der TU Braunschweig (rechts)*

Im Rahmen der ersten Versuchsreihe wurde auch speziell der Seiltyp geprüft, der für die Instandsetzung des im Abschnitt 1.2 genannten Bauwerks vorgesehen ist. Die erwarteten Beanspruchungen im Seil wurden vorab an einem räumlichen Tragwerksmodell der Brücke ermittelt und daraus ein Versuchsprogramm abgeleitet.

Während aller Versuche wurden zum einen die Maschinenwerte der Versuchseinrichtung wie Zugkräfte im Seil, Wege und Kräfte zur Aufbringung der Seil- bzw. Seilkopfauslenkungen messtechnisch erfasst. Des Weiteren wurden an einer Vielzahl von Stellen die Drahtspannungen über aufgeklebte Dehnmessstreifen gemessen. Mögliche Drahtbrüche der automatisiert ablaufenden Dauerschwingversuche wurden über Schall- bzw. Beschleunigungssensoren aufgezeichnet.

### 3 Ergebnisse

Über die Versuche wurden wichtige Erkenntnisse zum Trag- und Ermüdungsverhalten von vollverschlossenen Seilen im Seilendbereich gewonnen.

So konnte zum einen die zeitliche Entwicklung von Drahtbrüchen versuchsparallel aufgezeichnet und nachvollzogen werden. Die Zuordnung der Brüche zu ihrer Lage im Seil erfolgte im Anschluss an die

Versuche durch Öffnung bzw. Zerlegung der Seile. Hierfür wurden auch zum Teil die Vergussbereiche (Seilenden) freigelegt und untersucht.

Zum anderen dienten die Dehnungsmessungen auf der Seiloberfläche dazu, das Verhalten eines zwischenzeitlich entwickelten Tragwerksmodells zu validieren und zu optimieren. Mit diesem Modell konnten Versuchsabläufe rechnerisch nachvollzogen und die Beanspruchungen in den einzelnen Drähten des Seils (auch im Seilinneren) ermittelt werden.

Aus den Versuchsergebnissen in Kombination mit den rechnerischen Untersuchungen wurde ein anschauliches Schädigungsmodell für vollverschlossene Seile unter Biegung abgeleitet. Als maßgebend für die Ermüdungssicherheit zeigt sich demnach die zwischen den Seildrähten und dem Vergussmaterial auftretende Wirkung von Reibkorrosion.

Der Bauteilversuch für die Gelmer Brücke (siehe Abschnitte 1.2 und 3) wurde in Anlehnung an die Vorgaben in DIN EN 1993-1-11 (2010) durchgeführt und konnte als bestanden beendet werden. Auf Basis dieses Ergebnisses wurde eine Zustimmung im Einzelfall für die Instandsetzung der Hänger beantragt, die auch zwischenzeitlich erteilt wurde. Die Ausschreibung und Ausführung der Maßnahme erfolgte 2015 (siehe hierzu auch Schütz, K. G., Schmidmeier, M. (2013)).

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

In 2014 und 2015 werden die Ergebnisse der experimentellen und rechnerischen Untersuchungen abschließend zusammengestellt und aufbereitet. Der Schwerpunkt liegt dabei noch in der Ableitung eines praxistauglichen Nachweisverfahrens, mit dem planmäßig auftretende Biegung im Seilendbereich berücksichtigt werden kann.

Das Forschungsvorhaben wurde 2015 abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2015.

#### **5 Literatur**

DIN EN 1993-1-11 (2010-12): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl; Deutsche Fassung EN 1993-1-11:2006 + AC:2009

#### **6 Veröffentlichungen**

Schütz, K. G., Schmidmeier, M. (2013): Zur Ermüdungssicherheit von Brückenbauwerken; BAW Kolloquium 2013 „Erhalten und Ertüchtigen von Brückenbauwerken“, 04./05.11.2013, Karlsruhe

Schmidmeier, M. (2015): Ermüdungssicherheit vollverschlossener Seile unter Biegung: Münchner Stahlbautage 2015, 12. und 13. November 2015, Hochschule München.

## **Verwendung von Acrylatgelen und gelartigen Produkten für Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbauwerken im Verkehrswasserbau**

**Netzplan-Nr.:** A39510370005

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. M. Maisner, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** matthias.maisner@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Die Anwendung von Acrylatgelen für die Injektion von Rissen und Hohlräumen wurde und wird im Rahmen von Forschungsvorhaben hinterfragt und im Hinblick auf die Korrosionsgefährdung der Bewehrung und sonstiger metallischer Einbauteile kritisch bewertet. In einer Forschungsstudie der MFPA Leipzig wird für die nachträgliche Bewegungsfugenabdichtung u. a. die Verwendung von Acrylatgelen empfohlen. Allerdings wurden bei dieser Studie die besonderen Randbedingungen der WSV wie die Gefahr der Gewässerverschmutzung oder die sehr langen Nutzungsdauern der Bauwerke nur bedingt hinterfragt.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Acrylatgele bieten interessante Potentiale für das Füllen von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteilen und für die Ertüchtigung von Bewegungsfugen. Auf der anderen Seite müssen aber auch die Risiken, die mit der Anwendung solcher Materialien verbunden sein können, berücksichtigt werden. Durch die Anwendung von Acrylatgelen dürfen keinesfalls Schäden an Bestandteilen von Massivbauwerken, wie z. B. Bewehrung oder Fugenbänder, aber auch keine Umweltbeeinträchtigungen, initiiert werden. Im Falle eines Kontaktes der Acrylatgele mit der Betonbewehrung und Einbauteilen muss eine mögliche Korrosionsgefährdung hinterfragt werden. Aus Studien ist bekannt, dass der Aspekt der Dauerhaftigkeit der Acrylatgele ebenfalls hinterfragt werden muss.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Acrylatgele könnten bei Instandsetzungsmaßnahmen für das Füllen von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteilen oder für die Ertüchtigung von Bewegungsfugen eingesetzt werden und hier deutlich aufwendigere Instandsetzungslösungen überflüssig machen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen des FuE-Vorhabens soll, unterschieden für die Anwendungsbereiche "Injektion von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteilen" und "Ertüchtigung der Bewegungsfugen von Wasserbauwerken" die Bewertung der grundsätzlichen Eignung von Acrylatgelen für die Anwendung an Bauwerken der WSV hinterfragt werden. Ggf. sollen Kriterien für die Anwendung von Acrylatgelen für die o. g. Anwendungsbereiche erstellt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Teil A:

Erarbeitung einer Marktübersicht zu den für Rissinjektions- bzw. Fugeninstandsetzungsmaßnahmen eingesetzten Acrylatgelen und Verfahren. Bewertung des Gefährdungspotentials der Ausgangsstoffe und der ausreagierten Stoffe in Zusammenarbeit mit der BfG. Erstellung einer Übersicht zu bereits ausgeführten Maßnahmen innerhalb der WSV. Einholung von Erfahrungen mit vergleichbaren Maßnahmen außerhalb der WSV. Bewertung der grundsätzlichen Eignung von Acrylatgelen für die genannten Anwendungsbereiche.

Teil B:

Falls die Untersuchungen im Teil A eine grundsätzliche Eignung ergeben, sollen in einem Teil B Anwendungskriterien für die genannten Anwendungsbereiche (Erforderliche Leistungsmerkmale und Qualitätssicherung Baustoffe; Anforderungen an Bauverfahren; Qualitätssicherung Bauausführung etc.) erarbeitet werden.

### 3 Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit der Hochschule Mannheim wurde eine Masterarbeit zum Thema "Untersuchungen an Acrylatgelen in Betonmodellen mit Dichtelementen" erstellt. Im Rahmen der Masterarbeit wurden zunächst die physikalischen Eigenschaften von drei handelsüblichen Acrylatgelen untersucht. Später wurde noch ein Produkt mit Polymersionskomponente ausgewählt. Die ausgewählten Produkte wurden bereits teilweise pilotartig für die Instandsetzung bei Maßnahmen der WSV eingesetzt. Im nachfolgenden werden diese Gele mit A, B, C und D bezeichnet. Für die Instandsetzung von Bewegungsfugen in Verkehrswasserbauwerken wurden bislang nur die Gele A und C eingesetzt. Das nachfolgende Bild 1 zeigt die Kontaktreaktion zwischen Gel B und einem Bewehrungsseisen nach 3 Monaten Lagerung des Betonmodells. Mit Hilfe der Energiedispersionsanalyse (EDX) wurde festgestellt, dass die Fe-Ionen bis 23 mm Tiefe in das Gel diffundiert sind.

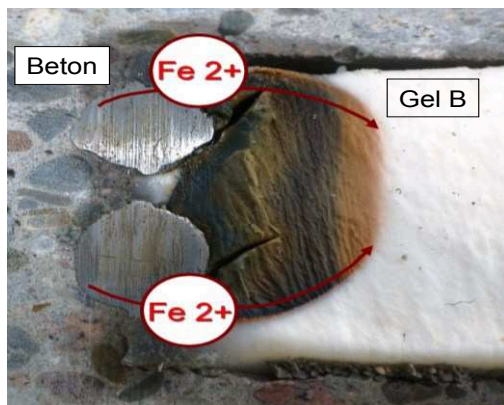


Bild 1: Bohrern, Gel B und Korrosionsspuren im Gel

Bei Gel A wurden dagegen erst nach 15monatiger Lagerung Korrosionsspuren in 18 mm Tiefe festgestellt. Anhand der Bohrkernentnahmen wurde eine Wechselreaktion von Acrylatgelen mit den Dichtelementen „beschichtete Fugenbleche“ und „Fugenbänder“ festgestellt. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass alle drei Gele als korrosionsfördernd bzw. als Korrosionsverursacher einzuschätzen sind. Acrylatgele werden als Alternative für die Füllung von Hohlräumen wie Kiesnester angesehen. Daher stellt die Lollipop-Probekörper-Variante "Künstliches Kiesnest" eine sinnvolle "Worst-Case" Betrachtung dar. Bild 2 zeigt die Diffusion im Gel B und die angerostete Arbeitselektrode.



Bild 2: Lollipop-Probekörper künstliches Kiesnest Gel B (oben) und gerostete Arbeitselektrode (unten).

Die gemessenen Stromdichten und die visuellen Untersuchungen der Probekörper und Arbeitselektroden zeigen, dass eine Korrosion durch Acrylatgele nicht auszuschließen ist. Aus Bild 3 ist die Tempe-

raurentwicklung der Gele während der exothermen Aushärtung mit einem Volumen von 10 l zu ersehen. Im Falle der Fugeninstandsetzung bei älteren Bauwerken muss berücksichtigt werden, dass vielfach thermoplastische Dichtelemente vorhanden sind, die nicht dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Daher ist bei den festgestellten Temperaturen eine Veränderung der Materialeigenschaften dieser Dichtelemente nicht auszuschließen.

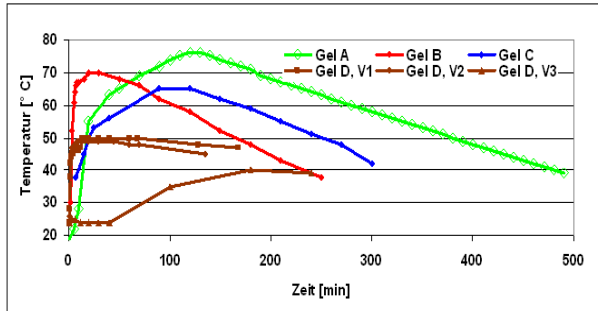


Bild 3: Temperaturanstieg bei der Aushärtung der Gele bei Anmischvolumina von ca. 10 bis 13 l

Mit der Bestimmung des spezifischen Widerstandes kann die Möglichkeit der Korrosion von Bewehrungsstahl bei Kontakt mit Acrylatgele abgeschätzt werden. Hierzu wurden Kunststoffbehälter mit Gel ausgefüllt. Als Elektroden dienten Edstahlgitter. Im Nasszustand zeigten die drei Gele eine gute Leitfähigkeit. Die Zugeigenschaften der Gele sind stark abhängig vom Wassergehalt und der Prüftemperatur. So zeigt Gel C beispielsweise bei Raumtemperatur nach 12 Tagen Trocknung an der Luft eine mittlere Bruchfestigkeit von 5,9 MPa bei einer mittleren Bruchdehnung von 6 %. Abschließend bleibt festzustellen, dass die bisherigen Untersuchungen der Gele gezeigt haben, dass Acrylatgele keineswegs uneingeschränkt für eine Fugeninstandsetzung anwendbar sind. Für die Gele C und D wurden in Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen Betonmodelle in 2013 hergestellt und nach 3monatiger Lagerungszeit Bohrkerne entnommen. Gel C zeigt in Kontakt mit Bewehrungsstahl Korrosionsspuren. Zur Untersuchung der Kontaktreaktionen mit Dichtelementen wurden nach einjähriger Lagerungszeit Bohrkerne aus dem Betonmodell entnommen und untersucht. Besonders kritisch war die Kontaktreaktion mit PVC.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Projekt wurde in 2015 beendet.

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2015.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

- Maisner, M.; Eßer, A.; Kwenjeu, A.; Westendarp, A.; Schnellenbach-Held, M. (2012): Quellfähige Acrylat-gele – Eine Instandsetzungsalternative für Bewegungsfugen in Verkehrswasserbauwerken?, Beton- und Stahlbetonbau 107, 2012 Heft 9, S. 601 – 612
- Maisner, M.; Eßer, Westendarp, A.; Schnellenbach-Held, M. (2013): Quellfähige Acrylatgele in Kontakt mit Dichtelementen/Stahl, TAE Tagungshandbuch 2013, Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, S. 549 – 559



**Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen****Netzplan-Nr.:** A39510370009**Projektleiter:** Dr.-Ing. T. Reschke, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)**E-Mail:** thorsten.reschke@baw.de**1 Problemstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei Wasserbauwerken aus Beton sind aufgrund der i.d.R. massigen Bauteile und der Durchfeuchtung optimale Reaktionsbedingungen für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) gegeben. Sofern die verwendete Gesteinskörnung alkaliempfindliche Bestandteile enthält, kommt es bei erhöhten Alkaligehalten im Beton (u. a. auch durch Alkalizufuhr von außen über Tausalze oder Meerwasser) zu Treibreaktionen mit der Folge von Rissen und Festigkeitsverlusten. Da mit dem bestehenden Regelwerk alkaliempfindliche Bestandteile nicht immer sicher erkannt und bewertet werden können, kam es in jüngerer Zeit auch bei Wasserbauwerken zu Schäden infolge AKR. Insbesondere für langsam reagierende Gesteine („slow-late-Gesteine“) sind neue bzw. modifizierte Prüfverfahren erforderlich, da die bislang angewendeten Schnellprüfverfahren entsprechende Schadensmechanismen nicht abbilden und die Untersuchungsdauer der üblichen Betonprüfungen („Nebelkammerversuch“) offenbar nicht ausreicht.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Nur durch eine sichere Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen im Vorfeld von Bau- und Instandsetzungsmaßnahmen sowie darauf abgestimmte Verwendungsregeln kann die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken gewährleistet werden. Nutzungseinschränkungen und Instandsetzungen bzw. der Ersatzneubau AKR-geschädigter Betonbauwerke können dann entfallen. Gegenüber der bisherigen Vorgehensweise kann zudem der im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit oft nachteilige und möglicherweise ungerechtfertigte Austausch örtlich verfügbarer, aber nicht sicher bewertbarer Gesteinskörnungen vermieden werden.

**1.3 Untersuchungsziel**

Um zukünftig AKR-Schäden an Betonbauwerken zu vermeiden und Gesteinskörnungen wirtschaftlich einzusetzen, sind Verfahren für eine sichere Bewertung der Alkaliempfindlichkeit bislang nicht sicher bewertbarer Gesteinskörnungen zu entwickeln bzw. zu modifizieren sowie Verwendungsregeln zu erarbeiten, welche die Randbedingungen und die Nutzungsdauer von Verkehrswasserbauwerken berücksichtigen.

**2 Untersuchungsmethoden**

Durch vergleichende Untersuchungen mit Betonprüfungen soll die Eignung bestehender und neu entwickelter Schnellprüfverfahren für verschiedene Gesteinskörnungen bewertet sowie eine Entwicklung bzw. Modifikation der Verfahren abgeleitet werden. Des Weiteren soll ein in den letzten Jahren entwickeltes Performance-Prüfverfahren, welches eine nachträgliche Alkalizufuhr berücksichtigt, an die spezifischen Beanspruchungen im Wasserbau angepasst und ebenfalls einbezogen werden.

Als Gesteinskörnungen sollen verschiedene bislang nicht sicher bewertbare Gesteinskörnungen (i.d.R. mitteldeutsche Kiese) eingesetzt werden, als Referenzmaterialien für einen Teil der Prüfungen zusätzlich als alkaliempfindlich bekannte Gesteinskörnungen (u.a. Opalsandstein und Flint, gebrochene Grauwacke). Die Performance-Prüfungen sollen an in der Praxis üblichen Betonzusammensetzungen erfolgen (Rezepturen aus Bauvorhaben der WSV). Alle Ausgangsstoffe (Zement, Zusatzstoffe, Gesteinskörnungen) werden durch Stoffprüfungen charakterisiert. Für die Zuordnung der Gesteinsarten sowie deren alkaliempfindliche Bestandteile soll vor Beginn der Untersuchungen eine petrografische Bewertung der Gesteinskörnungen erfolgen.



### 3 Ergebnisse

Insgesamt wurden 4 Gesteinskörnungen aus dem mitteldeutschen Raum in die Untersuchungen einbezogen. Nach den üblichen Stoffprüfungen und einer petrografischen Zuordnung wurden für jede der Gesteinskörnungen folgende Untersuchungen zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit durchgeführt bzw. begonnen:

- (a) Prismenschnelltest gemäß Alkali-Richtlinie
- (b) kombinierter Schnelltest BTU-SP
- (c) Betonprüfungen gemäß Alkali-Richtlinie
- (d) Performance-Prüfungen an Betonen.

Bei den Schnellprüfverfahren (a) zeigten alle untersuchten Gesteinskörnungen eine deutliche Alkaliempfindlichkeit. Der Grenzwert der Dehnung wurde bei allen 4 Gesteinskörnungen (GK) deutlich überschritten. Der chemische Schnelltest (b) hat sich nicht für alle untersuchten Gesteinskörnungen als geeignet erwiesen. Eine sichere Bewertung auch der „slow/late“-Gesteine war letztlich nur durch den Betonversuch gemäß Alkali-Richtlinie gegeben.

Für den Betonversuch (c) wurden mit allen 4 Gesteinskörnungen Betone mit einem speziellen Prüfzement mit erhöhtem Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent Zement 1,3 M.-%) sowie vergleichend mit einem NA-Zement hergestellt, 9 Monate in einer Nebelkammer bei 40°C und gesättigter Luftfeuchte gelagert und anhand der Dehnung sowie anhand von Gefügeschäden (Risse) beurteilt.

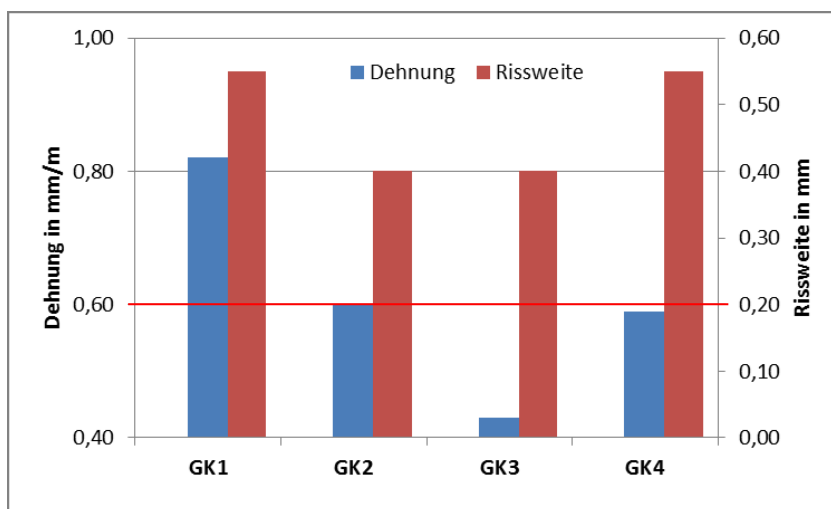


Bild 1 Dehnung und Rissweite der Nebelkammerproben

Unstrittig kritische Dehnungswerte wurden nur bei 2 Gesteinskörnungen erreicht. Trotz dieser insgesamt geringen Dehnungen wurden bei allen 4 Gesteinskörnungen an den massiven Probekörpern (30-cm-Würfel) starke Rissbildungen festgestellt, welche anhand der aufgetretenen Rissbreiten eine eindeutige Zuordnung zur Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-S bedingen. Bei langsam reagierenden Gesteinen vom Typ „slow/late“ werden daher Ergänzungen zum Verfahrensablauf der Betonversuche empfohlen, welche bei erkennbaren Anfangsschädigungen eine Verlängerung der Prüfdauer zur Folge haben.

Mit Betonen aus aktuellen Bauvorhaben der WSV wurden Performance-Prüfungen (d) für je 2 Varianten (ohne und mit Salzbelastung) durchgeführt. Jeder Lagerungszyklus umfasste neben einer Trocken- und Feucht-Warm-Lagerung auch mehrere Frost-Tau-Wechsel. Nach Abschluss der Performance-Prüfungen wurden an den Probekörpern lichtmikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen durchgeführt, um eine AKR als Schadensursache nachzuweisen. Bei den Betonen 2 und 4 wurden (im Vergleich zur Prüfung ohne Salzbelastung) deutliche AKR-Merkmale in Form erhöhter Dehnungen sowie Anlöseerscheinungen an Gesteinskörnern und AKR-Gel in Porenräumen nachgewiesen.

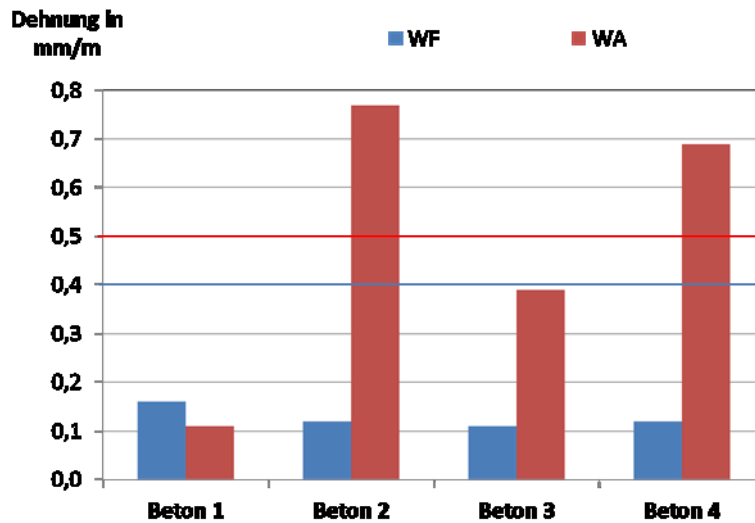


Bild 2: Dehnung der Proben während der Performance-Prüfung ohne Alkalizufuhr (WF – Grenzwert 0,4 mm/m) und mit Alkalizufuhr (WA – Grenzwert 0,5 mm/m)

Bei den Prüfungen ohne Alkalizufuhr (WF) wurde mit den Praxisrezepturen keine AKR initiiert, da der Alkaligehalt der verwendeten Zemente (im Gegensatz zum Prüfzement bei (c)) offenbar unter einer kritischen reaktionsauslösenden Grenze lag. Bei zusätzlicher Alkalizufuhr (WA) konnte dagegen bei 2 der 4 untersuchten Betone eine AKR nachgewiesen werden, welche während der bei Verkehrswasserbauwerken üblichen sehr langen Nutzungsdauer mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Schäden am Beton führen würde.

Die untersuchten Performance-Prüfungen haben sich für die Bewertung von Wasserbautypischen Betonen mit moderaten Zementgehalten sowohl ohne als auch mit Alkalizufuhr grundsätzlich als geeignet erwiesen. Auf dieser Basis kann daher zukünftig auch für die Feuchtigkeitsklasse WA (in erster Linie Meerwasserbauwerke) die Möglichkeit eröffnet werden, Betone mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen EIII-S durch Performance-Prüfungen mit externer Alkalizufuhr zu bewerten. Bei der Feuchtigkeitsklasse WF kann bei moderaten Zementgehalten ( $z \leq 350 \text{ kg/m}^3$ ) und gleichzeitiger Verwendung von NA-Zementen auf die bislang geforderte Performance-Prüfung verzichtet werden, da die Gesamtalkaligehalte unter diesen Randbedingungen nachweislich weit auf der sicheren Seite liegen.

Die aus den Versuchen abgeleiteten Empfehlungen und Vorgehensweisen wurden in den aktuellen Einföhrungserlass zur Alkali-Richtlinie (2015) aufgenommen.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Fertigstellung Abschlussbericht.

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2015.

#### 5 Literatur

Erlass WS 12/5257.6/2: DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ Ausgabe Oktober 2013 - Ergänzende Regelungen zur Alkali-Richtlinie im Geschäftsbereich der WSV. Bonn, 19.06.2015.

#### 6 Veröffentlichungen

Reschke, Th.; Seyfarth, K.; Giebson, C.; Ludwig, H.-M. (2015): Vermeidung einer betonschädigenden AKR bei langlebigen Wasserbauwerken. Tagungsband 19. ibausil Weimar, 16.-18.09.2015.

## **Parameter für Stoffgesetze bei FE-Berechnungen**

**Netzplan-Nr.:** A39520205613

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Herten, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** markus.herten@baw.de

## **1 Problemstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In letzter Zeit wurden viele neue Stoffgesetze, manche auch unter Mitwirkung der BAW, entwickelt und in kommerziellen Finite-Elemente-Programmen implementiert. Jedoch stellt sich die Frage, unter welcher Voraussetzung (Gegebenheiten) es notwendig ist, solche Modelle einzusetzen und welche Parameter für die Verwendung dieser Modelle wichtig sind. Weiterhin sollen die Stoffgesetze durch den Vergleich von Prognosen, die durch FE-Berechnungen unter Verwendung dieser Modelle ermittelt wurden, anhand der Messergebnisse an Bauwerken kalibriert werden.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Bedeutung für die WSV besteht darin, dass möglichst zutreffende Verformungsprognosen aufgestellt werden können. Dadurch wird sowohl eine größere Wirtschaftlichkeit erzielt, als auch mehr Sicherheit erreicht. Eine Simulation des Verhaltens von Bauwerken kann dadurch, insbesondere bei schwierigen Baugrundverhältnissen, weit besser als bisher möglich erfolgen.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Die Ziele der Untersuchung sind, die Parameter bereits vorhandener Stoffgesetze, aus Labor- und Feldversuchen zu ermitteln bzw. abzuleiten, Stoffgesetze an wasserbautypische Bedingungen anzupassen und in FE-Programmen zu implementieren.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Ursprünglich war der Fokus auf Laborversuche gelegt. Es hat sich jedoch im Laufe der Bearbeitung gezeigt, dass Felduntersuchungen und Nachrechnungen (B-Prediction) besser geeignet sind, die Prognosen zu optimieren. Auf dieser Grundlage sollen Mängel von existierenden, in FE-Software implementierten Stoffgesetzen durch Weiterentwicklungen bzw. neue Implementierungen gemindert werden.

## **3 Ergebnisse**

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhaben sind in einer Vielzahl von Veröffentlichungen (s. Abschnitt 6) dokumentiert. Im Abschlussbericht, der 2015 fertiggestellt wurde, sind die Ergebnisse aus der gesamten Forschungsarbeit zusammengetragen und themenbezogen dargestellt. Zudem gibt der Bericht eine Handlungsanweisung, wie man in zukünftigen Projekten an Verformungsprognosen herangehen sollte und was zu beachten ist.

## **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2015: Erstellung des Abschlussberichts

Laufzeit des Vorhabens: 1997 bis 2015

## **5 Literatur**

-/-

## 6 Veröffentlichungen

- Benz, T., (2007a): Small - Strain stiffness of soil and its numerical consequences. Dissertationsschrift. Mitteilung 55 des Instituts für Geotechnik, Universität Stuttgart, 2007.
- Benz, T., Vermeer, P. A. (2007b): Zur Berücksichtigung nichtlinearer Bodensteifigkeit im Bereich kleiner Dehnungen in geotechnischen Berechnungen, in Bautechnik 11, 2007, pp. 749-761.
- Benz, T., Schwab, R., Vermeer, P. A. (2007c): "Zur Berücksichtigung des Bereichs kleiner Dehnungen in geotechnischen Berechnungen", Bautechnik, Jg. 84, H. 11, S. 749-761, 2007.
- Benz, T., Schwab, R. (2008): "A quantitative comparison of four rock failure criteria", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Jg. 45, H. 7, S. 1176-1186, 2008, Elsevier, Amsterdam.
- Benz, T., Schwab, R., Kauther, R. A., Vermeer, P. A. (2008): A Hoek-Brown criterion with intrinsic material strength factorization. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 45, pp. 210-222, Elsevier, Amsterdam.
- Benz, T., Vermeer, P. A., Schwab, R. (2009): A small-strain overlay model. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Band 33 pp. 25-44, John Wiley & Sons, London.
- Herten, M., Schwab, R. (2007): Numerische Auswertung von instrumentierten Zugversuchen an Auftriebspfählen,
- Mey, A. (2006): „FE - Berechnung tiefer Baugruben mit einer Erweiterung des Hardening Soil Modells für den Bereich kleiner Dehnungen“, Diplomarbeit, Institut für Geotechnik Universität Stuttgart, 2006.
- Saathoff, J., Schwab, R. (2004): "Anwendung der Finite-Element-Methode (FEM) beim Entwurf der neuen Schleuse Sülfeld Süd", Baugrundtagung, Leipzig, 22. bis 25. September 2004, Glückauf, Essen, S. 89-96.
- Schwab, R., Benz, T. (2006): "Baubegleitende Simulation der Interaktion zwischen benachbarten Bauwerken", 18. Deutschsprachige Abaqus-Benutzerkonferenz, Erfurt, 18. - 19. Sept. 2006.
- Schwab, R., Benz, T., Vermeer, P. (2007): "An accompanying small-strain model for a large excavation", Proc. XIV European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid.
- Stelzer, O., Schwab, R., Neumann, S. (2010): Neubau der Südschleuse Sülfeld – Schlussfolgerungen aus den geotechnischen Messungen und den baubegleitenden FE Berechnungen, Messen in der Geotechnik, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig.
- Stelzer, O., Kauther, R. (2011): Relevance of small-strain stiffness in the deformation analysis of navigable locks, International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, September 1-3, Seoul, Korea.
- Zimmerer, M. M., Lobers, S., Schanz, T. (2007): Neubau Schleuse Dörverden, Modellkalibrierung von Labor- (Oedometer- und Triaxial-) und Feldversuchen (Ankerzugversuch), VAROCON in Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar, Weimar 2007.
- Zimmerer, M. M., Schanz, T. (2008): Neubau Schleuse Minden, Standsicherheitsanalyse für die Böschung der Baugrube der neuen Weserschleuse in Minden, VAROCON in Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar, Weimar 18. Oktober. 2008.

## **Modellierung des Tragverhaltens von Verpressankern in Sand**

**Netzplan-Nr.:** A39520270003

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Herten, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** markus.herten@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Verpressanker weisen ein äußerst komplexes Tragverhalten auf, welches von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Da die Vorgänge des Lastabtrags in den Boden und die Einflüsse verschiedener Herstellungsparameter auf den Herauszieh Widerstand wenig bekannt ist, basiert die Bemessung von Verpressankern bisher auf empirischen Werten. Falls für die Vorbemessung nicht genügend Erfahrungswerte für die örtlichen Baugrundverhältnisse zur Verfügung stehen, müssen gegebenenfalls im Vorfeld Probeanker für vorgezogene Eignungsprüfungen hergestellt werden. Um die in der Ausführungsstatik geforderte Tragfähigkeit nachzuweisen, ist in der Regel für jede Baumaßnahme eine Eignungsprüfung an drei Anker und nach der Herstellung an jedem Anker ein Belastungstest (Abnahmeprüfung) vorgeschrieben. Die Feststellung des tatsächlichen Herauszieh Widerstandes erfordert jedoch eine Belastung bis zum Versagen des Ankers.

Für die realistische Simulation des Tragverhaltens von Verpressankern ist die Berücksichtigung der einzelnen Mechanismen des Tragverhaltens (Verbund zwischen Zement und Boden, Verspannung im Baugrund durch Dilatanz, Lastumlagerung am Verpresskörper etc.) notwendig. Diese sind bisher jedoch noch nicht ausreichend untersucht. Unter anderem ist nicht vollständig geklärt, inwiefern die Ankerherstellung und insbesondere der Verpressvorgang den Spannungszustand und die Bodeneigenschaften des anstehenden Bodens verändert und welchen Einfluss die Höhe des Verpressdrucks auf den Herauszieh Widerstand hat. Da die mechanischen Eigenschaften und der Spannungszustand des anstehenden Bodens jedoch entscheidend für die realistische Simulation des Tragverhaltens von Verpressankern sind, ist eine zuverlässige numerische Berechnung des Herauszieh Widerstands bisher nicht möglich.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

In der WSV wird jährlich eine Vielzahl von Verpressankern hergestellt. Die Tragfähigkeit dieser Anker ist neben den Baugrundeigenschaften und dem Ankertyp trotz normativer Regelungen maßgeblich von der Herstellung beeinflusst, d. h. verschiedenen Firmen bzw. auch Kolonnen einer Firma erreichen unterschiedliche Herauszieh Widerstände. Gelingt es, maßgebliche Herstellungsparameter zu identifizieren, können diese entsprechend gefordert und überwacht werden. Des Weiteren ermöglicht ein besseres Verständnis des Tragverhaltens von Verpressankern gegebenenfalls die numerische Prognose des Herauszieh Widerstands und eine Validierung der zurzeit üblichen empirischen Abschätzung.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist die Entwicklung eines numerischen Modells, welches das Tragverhalten von Verpressankern unter bestimmten Randbedingungen abbildet. Als Grundlage sollen hierfür die Mechanismen der Lastabtragung sowie die Herstellungseinflüsse zur Optimierung der Ankertechnik ermittelt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Im Rahmen der Herstellung von Probeankern finden an verschiedenen Standorten Druckmessungen im Bohrloch während und nach dem Verpressvorgang statt. Verpressanker werden mit Drucksensoren bestückt, um die Verteilung des Verpressdrucks über die Verpresskörperlänge zu untersuchen. Sondierungen mit einem Flat-Dilatometer sollen Aufschluss über den Einfluss der Ankerherstellung auf den Spannungszustand im angrenzenden Boden geben.

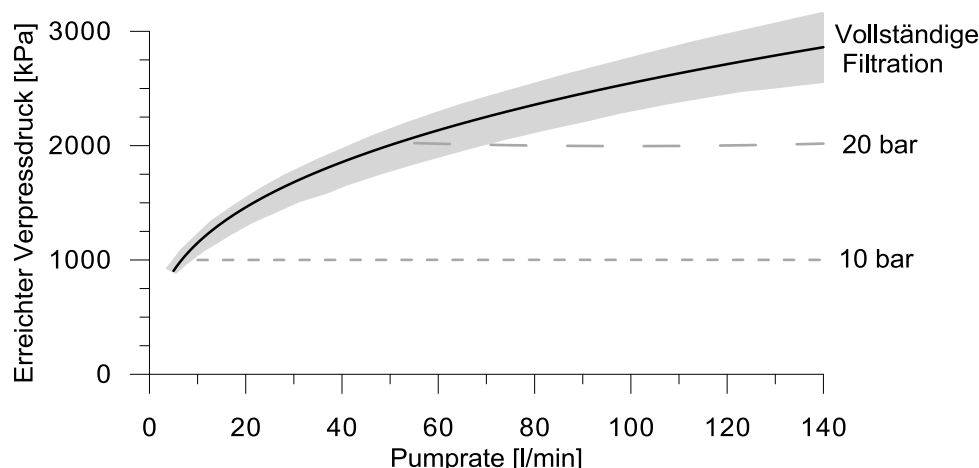
Ergänzend zu den Feldversuchen wird anhand von Laborversuchen das Filtrationsverhalten von Zementsuspension in Sand sowie die mechanischen Eigenschaften des noch nicht ausgehärteten Verpressgutes untersucht.

Auf der Grundlage der durchgeführten Feld- und Laborversuche wird ein numerisches Modell entwickelt, welches den Einfluss des Herstellungsprozesses von Verpressankern berücksichtigt.

### 3 Ergebnisse

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass während der Herstellung von Verpressankern in nichtbindigen Böden Wasser aus der Zementsuspension abgefiltert wird und in der Verpressstrecke ein steifer Filterkuchen entsteht. Um die Zementfiltration abzubilden erwies sich das Zwei-Phasen-Filtrationsmodell als gut geeignet. Das Zwei-Phasen-Filtrationsmodell wurde in die FEM implementiert und so der Filtrationsprozess während der Ankerherstellung simuliert.

Beim Verpressen in nichtbindigen Böden entsteht der Verpressdruck durch den hydraulischen Widerstand des Filterkuchens. Die Höhe des erreichten Verpressdrucks hängt dabei von der Pumprate und der Transmissivität des Filterkuchens ab. Aus der numerischen Studie ergab sich die in Bild 1 dargestellte Abhängigkeit der erreichbaren Verpressdrücke von der Pumprate. Die Durchlässigkeit des Bodens spielt hier eine untergeordnete Rolle, da sie wesentlich größer ist als die des Filterkuchens. Über den Filterkuchen werden die Porenwasserdrücke der Suspension als effektive Spannungen in den Boden übertragen.



*Bild 1: Schematische Darstellung der erreichten Verpressdrücke während der Ankerherstellung*

Nach dem Verpressen behindert der Filterkuchen die Rückverformung des Bodens und so wird ein Teil der beim Verpressen erzeugten Radialspannungen aufrechterhalten. Diese Erhöhung der Radialspannungen wurde sowohl durch In-situ Messungen als auch FEM-Simulationen bestätigt. Hierbei spielen sowohl der Verpressdruck als auch die Verpressdauer eine Rolle. Je höher der in der Verpressstrecke erreichte Verpressdruck, desto größer sind die verbleibenden radialen Spannungen für den Fall, dass die Suspension im gesamten Bohrlochquerschnitt ausgefiltert ist.

Sobald der Zement innerhalb der Verpressstrecke vollständig ausfiltert, setzt sich die Filtration allerdings auch innerhalb der Verrohrung fort, und es bildet sich auch hier ein Filterkuchen. Durch das Verschließen der Verrohrung steigt der Verpressdruck an der Pumpe weiter an, ohne dass dies einen maßgeblichen Einfluss auf die Spannungen in der Verpressstrecke hat. Demnach ist der in der Verpressstrecke erreichte Verpressdruck maßgeblich, nicht jedoch der an der Pumpe gemessene. Dies erklärt auch die weit verbreitete Beobachtung, dass bei Verpressdrücken über 10 bar die Ankerkapazität nicht weiter gesteigert werden kann: Bei den üblichen Pumpraten wurden wahrscheinlich keine Drücke über 10 bar innerhalb der Verpressstrecke erreicht, sondern nur an der Pumpe. Weiteres

Verpressen bewirkte lediglich eine Filtration der Suspension in der Verrohrung, ohne Einfluss auf die Radialspannungen.

Die Zementfiltration hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Erfolg des Verpressens, da der Filterkuchen erst das Aufbringen des Verpressdrucks ermöglicht, eine Rückverformung des Bodens verhindert und somit ein Teil der Radialspannungen, wie in Bild 2 belegt, dauerhaft aufrechterhalten werden. Dies erklärt auch die unterschiedlichen Erfahrungen mit der Herstellung von Verpressankern in bindigen und nichtbindigen Böden. In bindigen Böden wird der Verpressdruck durch den hydraulischen Widerstand des Bodens selbst erreicht und lediglich als Porenwasserüberdruck in den Boden eingeleitet. Es findet kaum Filtration statt. Da sich lediglich flüssige Suspension in der Verpressstrecke befindet, kann der Boden sich nach dem Verpressen wieder vollständig zurückverformen und entlasten. Somit werden keine zusätzlichen Radialspannungen dauerhaft eingeprägt.

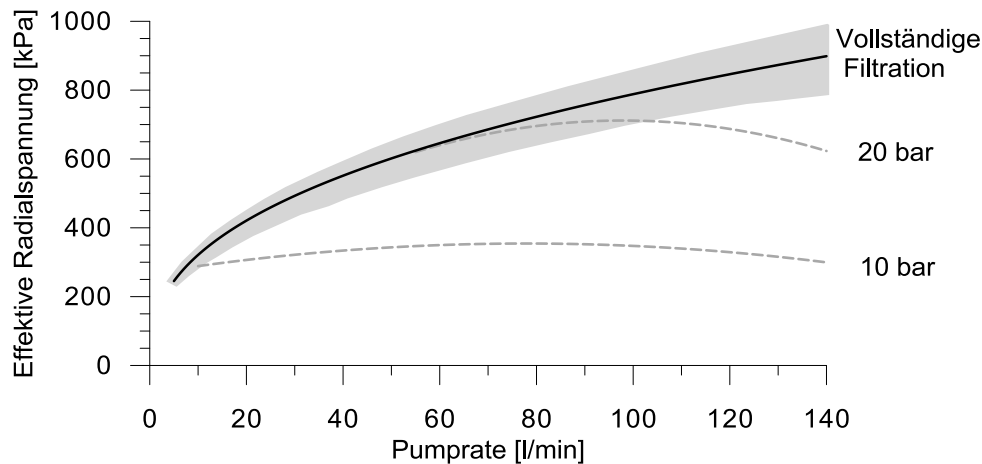


Bild 2: Schematische Darstellung der verbleibenden effektiven Radialspannung auf dem Verpresskörper nach dem Verpressen

Die bisher gewonnenen Erkenntnisse dienen einem besseren Verständnis der Vorgänge während der Ankerherstellung und können nun bei der Qualitätskontrolle auf der Baustelle genutzt werden, da der Einfluss verschiedener Herstellungsparameter besser eingeschätzt werden kann. Zudem wird eine weitere Optimierung der Ankerherstellung ermöglicht.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

- Domes, X. A. L. und Benz, T. (2015): Untersuchungen zur Zementfiltration während der Herstellung von Verpressankern in nichtbindigen Böden. Bautechnik 92 (9), S. 605–616.
- Domes, X. A. L. (2015): Cement grouting during installation of ground anchors in non-cohesive soils. Doctoral theses, Trondheim : Norwegian University of Science and Technology
- Stodieck, X.; Benz, T. (2014): Zementfiltration bei der Herstellung von Verpressankern in nichtbindigen Böden. Tagungsband des Johann-Ohde-Kolloquiums der TU Dresden und der Bundesanstalt für Wasserbau, Dresden, 26. März 2014.
- Stodieck, X.; Benz, T. (2013): Cement grout filtration in non-cohesive soils. In: "Installation effects in geotechnical engineering : proceedings of the International Conference on Installation Effects in Geotechnical Engineering, Rotterdam, the Netherlands, 24-27 March 2013", Hicks, Michael A. [Hrsg.], CRC Press/Balkema..

## **Entwicklung des Zustands von Deckwerken bei Absenkung des technischen Standards**

**Netzplan-Nr.:** A39520470004

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Kayser, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** jan.kayser@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zur Förderung der Binnenschifffahrt in Deutschland ist es sinnvoll, eine weitest gehende Befahrbarkeit des Wasserstraßennetzes auch mit großen Binnenschiffen (GMS über 10 m Breite) zu ermöglichen. Dieses Ziel ist mit dem Ausbau vorhandener Wasserstraßen nach den „Richtlinien für Regelquerschnitte an Binnenschifffahrtskanälen“ des BMVBS mit Vertiefung, Verbreiterung und dementsprechend auch neuen, ausreichend bemessenen Böschungs- und Sohlensicherungen realisierbar. Dabei wird ein guter Standard für sichere, wirtschaftliche und unterhaltungsarme Deckwerke sowie hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Gewässerquerschnitt und Schiffsgröße erreicht.

Aus ökologischen oder wirtschaftlichen Gründen ist dieser umfängliche Ausbau der Wasserstraßen jedoch nicht in allen Fällen sinnvoll oder durchsetzbar. Um trotzdem eine möglichst weitgehende Befahrbarkeit des Wasserstraßennetzes für große Binnenschiffe zu erhalten, wird zunehmend eine Absenkung des technischen Standards (Standardabsenkung) in Betracht gezogen. Diese Standardabsenkung führt zu verhältnismäßig kleinen Querschnitten (Gewässertiefen und/oder Breite), zu Einschränkungen von Fahr Situationen (Richtungsverkehr, Überholverbote) und zu - bezogen auf die gängigen Bemessungsregeln - unterdimensionierten Deckwerken. Die Standardabsenkung kann zur Überlastung der Wasserstraßen führen, was sich wiederum negativ auf die Sicherheit und Langzeitstabilität der Ufersicherungen, die größtenteils als Deckwerke ausgeführt werden, auswirkt. Derzeit gibt es kein Verfahren, mit dem die Auswirkungen einer Überlastung von Deckwerken auf deren Zustandsentwicklung bzw. den erforderlichen Unterhaltungsaufwand quantifizierbar wäre.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Auswirkungen einer Standardabsenkung in der Wasserstraße auf die Standsicherheit und Langzeitbeständigkeit von Böschungs- und Sohlensicherungen projektspezifisch prognostiziert werden um dann über die technische und wirtschaftliche Notwendigkeit von Ausbau, Teilausbau oder Ertüchtigung von Ufersicherungen oder auch über verkehrliche Einschränkungen fundiert entscheiden zu können.

Die Kernfrage ist, wie sich unterbemessene Ufersicherungen mittel- und langfristig entwickeln werden. Bekannt ist derzeit nur, dass überlastete (unterbemessene) Deckwerke einen bis zu 8-fach höheren Unterhaltungsaufwand als normal belastete (standardgemäß bemessene) Deckwerke erfordern. Als wissenschaftliche Grundlage zur Bewertung der Belastung eignen sich die im GBB beschriebenen Bemessungsregeln.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Anlagevermögen der WSV sind ca. 20 Mrd. € in Ufersicherungen, ein großer Teil davon in Deckwerken enthalten. Ufersicherungen haben in Teilbereichen eine große Sicherheitsrelevanz.

Eine Standardabsenkung in der Ausführung von Ufersicherungen birgt daher große wirtschaftliche und technische Risiken. Die Abschätzung dieser Risiken ist eine wichtige Grundlage für Entscheidungen hinsichtlich zulässiger Schiffsverkehre und/oder Investitionen in das Gewässerbett und dessen Sicherung.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung eines Verfahrens zur differenzierten Prognose des Zustands bzw. des Unterhaltungsaufwands für Deckwerke unter Berücksichtigung projektspezifischer Randbedingungen hinsichtlich der vorhandenen Ufersicherung und der hydraulischen Belastung. Die



hydraulische Belastung wird wiederum maßgeblich durch der Geometrie des Gewässers und den Schiffsverkehr (Schiffsflotte, Fahrverhalten, Frequenz) bestimmt.

## 2 Untersuchungsmethoden

Für die Prognose von Bauwerkszuständen gibt es bereits verschiedene Verfahren. Für Deckwerke erscheint es sinnvoll, sich an Systemen der Fahrbahnunterhaltung für Straßen zu orientieren, die auf statistischen Verfahren basieren (Fastrich und Girmscheid, 2010). In Vorstudien hat sich gezeigt, dass hier Prognoseverfahren auf der Grundlage von Markov-Ketten unter Berücksichtigung der zufällig verteilten Einflussgrößen sinnvoll sind.

Die hierfür erforderlichen Basisdaten sollen über die Bemessung nach GBB mit der Software GBBSOft mit Monte-Carlo-Simulationen ermittelt werden. Die hydraulischen Belastungen, die Schiffsflotten und das Fahrverhalten der Schiffe sind hierfür statistisch zu beschreiben. Dies erfolgt zunächst beispielhaft an bereits vorhandenen Messungen an Wasserstraßen. Die dabei gewonnenen statistischen Modelle sollen möglichst allgemein formuliert werden, um auf zukünftige Projekte übertragbar zu sein.

## 3 Ergebnisse

Die Untersuchungen im Rahmen der Forschungsarbeit wurden in den drei Schritten durchgeführt:

- Prognose der schiffsinduzierten hydraulischen Einwirkungen auf Ufersicherungen in einem Belastungsspektrum mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen,
- Prognose der Zustandsentwicklung von bestehenden Deckwerken in Abhängigkeit von der hydraulischen Belastung und des vorhandenen Aufbaus mit Markov-Ketten und
- Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Standard der Bemessung und dem wirtschaftlichen Aufwand für die Unterhaltung.

In dem ersten Schritt konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen der Schiffsverkehr mit seinen wesentlichen Parametern für Schiffe und Fahrweise simuliert werden kann. Grundlage dafür sind Angaben zur vorhandenen oder zukünftigen Schiffsflotte und Naturuntersuchungen zum Fahrverhalten der derzeitigen Flotte. Die hydraulischen Belastungen, die sich im Ergebnis der Simulation berechnen lassen, liegen über den tatsächlich gemessenen Werten (s. Abb. 1, Untersuchungen für den Wesel-Datteln-Kanal). Ein wesentlicher Grund für diese Abweichungen sind die auf eine sichere Bemessung hin entwickelten und entsprechend konservativen Grundsätzen der Bemessung nach GBB (BAW, 2010). Es konnte gezeigt werden, dass Messungen und Simulationen über einen Anpassungsfaktor zwischen 0,55 und 0,70 aneinander angepasst werden können.

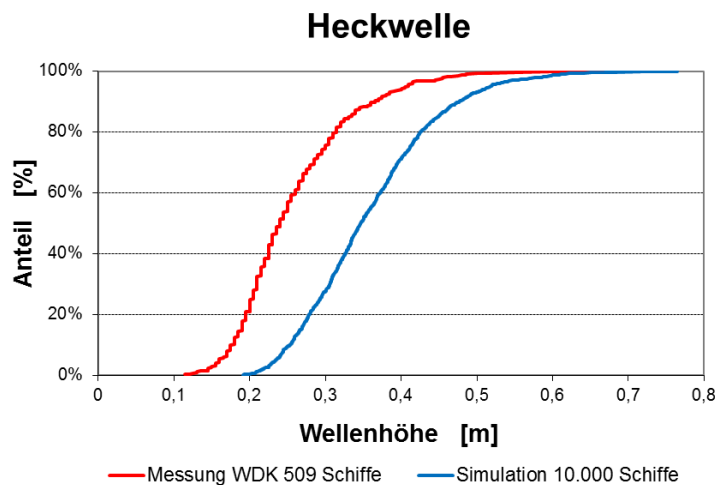


Bild 1: Gemessene und simulierte Höhen von Schiffsheckwellen

Auf der Grundlage der Simulation kann bei der Bemessung von Deckwerken zukünftig entschieden werden, auf welches Sicherheitsniveau die Ufersicherung ausgelegt werden soll bzw. welches Sicherheitsniveau eine vorhandene Ufersicherung besitzt. Bei der Weiterentwicklung der Software GBBSOft

zu GBBSoft+ wird ein Variantengenerator implementiert, mit dessen Hilfe eine Simulation einfach durchzuführen ist, sofern die erforderlichen Daten vorliegen. Weitere Untersuchungen hierzu können im Rahmen des Auftrags „Beurteilung von Ufersicherungen und Fahrrinnenquerschnitten an Wasserstraßen mit geringem Verkehrsaufkommen (Kategorie C)“ durchgeführt werden.

Für den Zustand eines Deckwerks in Abhängigkeit von der hydraulischen Belastung und von der Dimensionierung der Deckschicht wurde versucht anhand der hydraulischen Belastung von Einzelergebnissen mit Hilfe von Markov-Ketten die Entwicklung zu prognostizieren. Es zeigte sich, dass der exponentielle Ansatz der Markov-Kette hierfür nicht geeignet ist. Daher wird es sinnvoller sein in weiteren Untersuchungen periodenbezogene (z. B. jährliche) Übergangswahrscheinlichkeiten zu ermitteln und damit eine Markov-Matrix für Deckwerke aufzubauen. Ein wichtiger Parameter hierfür ist sicherlich das Bemessungsniveau: je höher das Bemessungsniveau (prozentualer Anteil an Unterschreitung der Grenzbedingung), desto kleiner sind die Übergangswahrscheinlichkeiten  $p_{i,i+1}$  (und damit umso größer die Wahrscheinlichkeiten  $p_{i,i}$ ). Aber auch die unterschiedlichen Bauweisen für Deckwerke sind zu berücksichtigen, so ist z. B. die Wahrscheinlichkeit des Erreichens von Zustand  $Z_2$  (Filter liegt frei) umso geringer, je stärker die Deckschicht dimensioniert ist. Die Übergangswahrscheinlichkeiten könnten z. B. im Rahmen einer Expertenumfrage (Delphi-Methode) ermittelt werden.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit konnte anhand von Daten aus dem Forschungsvorhaben „Bestandsaufnahme bestehender Deckwerke“ für Deckwerke mit loser Steinschüttung ein Zusammenhang zwischen dem Unterhaltungsaufwand und der Anzahl der Überbeanspruchung (Einwirkung > Widerstand) nachgewiesen werden (s. Bild 2).

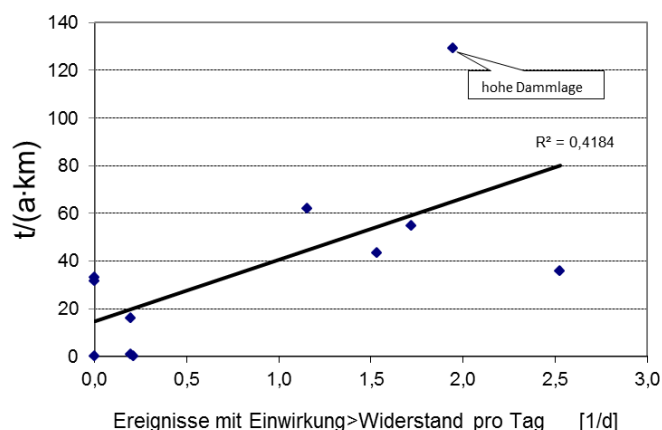


Bild 2: Unterhaltungsaufwand in Abhängigkeit der Anzahl an Ereignissen mit Überbeanspruchung

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Forschungsvorhaben wurde in 2015 abgeschlossen. Es ist eine Vertiefung im Rahmen des Expertennetzwerkes mit Untersuchungen zur zuverlässigkeitsbasierten Deckwerksbemessung vorgesehen.

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2015

#### 5 Literatur

- Fastrich, A., Girmscheid, G. (2010): Optimierungsmodell – Probabilistische Optimierung des Straßenunterhaltung mittels Markov-Ketten und Monte-Carlo-Simulation, Bauingenieur, Band 85, S. 471 – 481
- BAW (2010): Grundlagen der Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

#### 6 Veröffentlichungen

- Kayser, J. (2012): Dimensionierung von Ufersicherungen mit Deckwerken unter Beachtung der Belastungsintensität, Tagungsband „Johann-Ohde-Kolloquium“, BAW Mitteilungen Nr. 95, Karlsruhe

## **Numerische Simulation von hydraulisch induziertem Sedimenttransport in Erdbauwerken**

**Netzplan-Nr.:** A39520470005

**Projektleiterin:** H. Pfletschinger-Pfaff, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** heike.pfletschinger@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Durchsickerung von Erdbauwerken aufgrund hydraulischer Potentialunterschiede beeinflusst deren innere und äußere Stabilität. Mögliche Versagensmechanismen resultieren u.a. aus Partikeltransport im Erdbauwerk, der zu einer Veränderung der Porenstruktur und somit zu einer Veränderung der hydraulischen und mechanischen Bodeneigenschaften führen kann. Die Nicht-Linearität und starke Kopplung der hydraulischen Transport- und damit induzierten Strukturänderungsprozesse erschweren eine numerische Berechnung und Prognose der inneren Standsicherheit von Erdbauwerken. Bisherige numerische Modelle beschreiben i.d.R. nur Teilprozesse oder spezielle, kontrollierte Laborversuche. Erprobte kommerzielle Programme mit gekoppelten hydro-mechanischen Berechnungen basieren meist auf der Finite Elemente Methode und sind damit in ihrer Anwendung auf Fragestellungen, die Porenstruktur und Einzelkorngefüge betreffen, eingeschränkt (z.B. Plaxis, Code Bright).

Zur Erweiterung bestehender kontinuumsmechanischer mathematischer Beschreibungen nach der Theorie Poröser Medien (TPM) (z.B. de Boer, 2000) wurden u.a. am Lehrstuhl Kontinuumsmechanik der Ruhr-Universität Bochum Ansätze entwickelt, in denen die poröse Struktur eines Bodenkörpers als Mehrphasenkontinuum dargestellt wird. Entsprechend der Problematik der Beschreibung von Erosionsprozessen umfasst das Modell eine erodierbare Phase, eine feste Phase, sowie eine Fluid-Phase und eine Suspensions-Phase (z.B. Steeb und Scheuermann, 2012). Die Mikrostruktur des Bodens wird hierbei durch eine volumetrische Quantifizierung der einzelnen Phasen auf die makrostrukturelle Betrachtung übertragen. In weiteren Arbeiten gilt es, diese Ansätze zu verifizieren und zu erweitern.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine zuverlässige numerische Darstellung gekoppelter hydraulischer und geomechanischer Prozesse in Erddämmen ergänzt bestehende Stabilitätsberechnungen und Filterbemessungsmethoden. Die Berücksichtigung der Mikrostruktur und kontinuumsmechanische makrostrukturelle Berechnungsansätze ermöglicht die Simulation einsetzender Erosionsprozesse mit bestehenden Finite Elemente Programmen unter Einsatz relativ niedriger Rechnerleistung.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Arbeit ist es, geeignete numerische Methoden zur Darstellung von Fluid-Festkörper-Interaktionen in Erdbauwerken unter hydraulischem Potential zu testen bzw. weiterzuentwickeln. Hierbei sollen insbesondere Prozesse des hydraulischen Materialtransports und resultierende Änderungen der hydraulischen und mechanischen Bodeneigenschaften anhand der Theorie Poröser Medien simuliert werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Es werden sowohl anhand von Literaturstudien, als auch durch praktische Tests verschiedene numerische Methoden auf ihre Eignung zur Darstellung gekoppelter hydro-mechanischer Prozesse in porösen Medien geprüft.

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Kontinuumsmechanik der Ruhr-Universität Bochum werden bestehende mathematische Beschreibungen zur Simulation interner Erosion in Erdbauwerken anhand der TPM diskutiert, getestet und entsprechend der Fragestellung erweitert. Die Grundlagen der Methode liegen in der Erstellung eines thermodynamisch konsistenten Gleichungssystems unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Phasen eines Boden-Wasser-Gemischs. Zur numerischen Implemen-

tierung des mathematischen Konzeptes wird das Finite Elemente Programm COMSOL Multiphysics® verwendet. Bestehende und entwickelte Modellansätze werden anhand von Mess- und Erfahrungswerten aus Versuchen und der Praxis evaluiert. Zusätzlich werden zum besseren Verständnis von Materialeintrags- und Abtragsmechanismen in einer festen porösen Struktur porenskalige Mikrozellenversuche entwickelt und durchgeführt.

### 3 Ergebnisse

Nach Recherche für verschiedene numerische Methoden zur Eignung für die Darstellung gekoppelter hydro-mechanischer Prozesse in porösen Medien ist das vorgestellte Mehrphasenkonzept nach der Theorie Poröser Medien ein vielversprechender Ansatz und bildet den weiteren Schwerpunkt der Arbeit.

Das bestehende mathematische Modell wird bereits eingesetzt zur Simulation grundsätzlicher Prozesse der Infiltration (Schaufler et al., 2013). Da die an der BAW vorhandenen bodenmechanischen numerischen Simulationsprogramme Plaxis und Abaqus nicht zur Implementierung des gewählten mathematischen Ansatzes geeignet sind, wurde das Finite Elemente Programm Comsol Multiphysics® angeschafft. Innerhalb des mathematischen Moduls, in dem eigene partielle Differentialgleichungen implementiert werden können, wurde zunächst ein einfaches 2-Phasen-System zur Konsolidierung beschrieben.

Mit Implementierung des Erosionsmodells nach Steeb und Scheuermann (2012) in Comsol Multiphysics® wurden einfache 2-dimensionale Anfang-Randwertprobleme simuliert, um die Gültigkeit des mathematischen Modells zu testen. Mit zusätzlicher Implementierung eines linear-elastischen Bodensstoffgesetzes konnten die Abhängigkeiten der Primärvariablen des Modells nachvollzogen werden. Eine Parameterstudie verdeutlichte die hohe Sensitivität des im Modell implementierten Terms zur Simulation des Materialabtrags hinsichtlich der hydraulischen Leitfähigkeit des Materials.

Erste Simulationen zur Modellvalidierung anhand von Literaturdaten aus Permeameter-Versuchen (Mof-fat und Fannin, 2006) zeigten, dass insbesondere im Modell implementierte Konstitutivbeziehungen noch stark vereinfacht sind. Lokale Versagensmechanismen der Versuche konnten unter Berücksichtigung heterogener Anfangsbedingungen annähernd qualitativ und quantitativ nachvollzogen werden.

Die durchgeführten Mikrozellenversuche haben eine starke Abhängigkeit des Partikeltransports und der Partikelanhaftungs- sowie Blockierungsmechanismen in einer porösen Struktur von der strukturierten Tortuosität gezeigt. Die Versuchsergebnisse unterstützen die Verbesserung der im Modell implementierten Konstitutivbeziehung zur Beschreibung des Sedimenttransport und der Partikel-Struktur-Interaktion.

Im Ergebnis der Untersuchungen kann festgestellt werden, dass das Modell zur qualitativen Evaluierung der Erosionsdynamik in Bodensäulen oder Erdbauwerken geeignet ist. Hierzu müssen jedoch die erosionsbestimmenden Bodenparameter bekannt sein. Für quantitative Prognosen des Sedimenttransports in Erdbauwerken und daraus resultierende Stabilitätsänderungen sind weitere Untersuchungen, die sowohl die Poren- als auch die Ingenieurskala beinhalten, notwendig.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015 (Januar bis März):

- Evaluierung der eingesetzten Methoden
- Formulierung für weiteren Entwicklungsbedarf

Das Forschungsvorhaben wurde mit der Erstellung des Abschlussberichts in 2015 abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

## 5 Literatur

- de Boer, R. (2000): Theory of Porous Media. Highlights in the historical development and current state. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Moffat, R.; Fannin, R. J. (2006): A Large Permeameter for Study of Internal Stability in Cohesionless Soils. Geo-technical Testing Journal. Vol. 29(3):273-270.
- Schaufler, A.; Becker, C.; Steeb, H. (2013): Infiltration processes in cohesionless soils. Z. angew. Math. Mech., 93:138-146.
- Steeb, H.; Scheuermann, A. (2012): Modelling internal erosion: A continuum based model enriched by microstructural information. Acta Geotechnica, submitted, 2012.

## 6 Veröffentlichungen

- Pfletschinger-Pfaff, H., Kayser, J., Steeb, H. (2014): Numerische Simulation von Suffosion. Tagungsband BAWKolloquium. Filter und hydraulische Transportvorgänge in Böden. 28. Januar 2014. Hannover.
- Pfletschinger-Pfaff, H., Kayser, J., Steeb, H. (2014) Mehrphasen-Modell zur Simulation von Suffosion. Tagungsband des Ohde-Kolloquiums. 26. März 2014. Dresden. Mitteilungen - Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden. Band 19.

## **Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen**

**Netzplan-Nr.:** A39520570002 (alt: A39560610020)

**Projektleiter:** Dipl.-Phys. R. Zierach, Abteilung Geotechnik, Referat Baugruddynamik (BD)

**E-Mail:** rahula.zierach@baw.de

## **1 Problemstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Messergebnisse von sachgemäß und im erforderlichen Umfang durchgeführten Erschütterungsmessungen stellen bei Kenntnis der eingesetzten Technik und Energie der Erschütterungsquellen ähnlich wertvolle Aufschlüsse wie Bohrungen oder Sondierungen für die untersuchten Baugrundbereiche dar. Diese Ergebnisse gilt es für weitere Aufgaben der WSV zu nutzen. Nutzbare Veröffentlichungen darüber sind kaum vorhanden, da diese Kenntnisse einen Teil des „Know-how“ der einschlägigen Institutionen ausmachen. Die BAW verfügt inzwischen über große Datenmengen von Erschütterungsmessungen bei Baumaßnahmen an Wasserstraßen.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Auf Baustellen der WSV ist die Nutzung erschütterungsintensiver Bauverfahren wie Rammen, Vibrationsrammen, Vibrationsverdichten, Sprengen, Meißeln u. ä. nach wie vor unverzichtbar. Auf Grund der z. T. anzutreffenden Erschütterungsempfindlichkeit moderner Produktionsanlagen und zunehmender Sensibilität von Menschen in Wohngebäuden gegenüber Erschütterungen sind in der Vorbereitung von Baumaßnahmen immer häufiger auch erschütterungsärmere Schwingungsquellen wie z. B. Schiffs-, Baustellen- und Straßenverkehr zu berücksichtigen. Zuverlässige Erschütterungsprognosen können entscheidende Hinweise für die Auswahl zulässiger Bauverfahren, für die Fahrweise (z. B. Drehzahl von Vibrationsrammen) von Baumaschinen sowie für Art und Umfang von Beweissicherungsmaßnahmen bei erschütterungsintensiven Baumaßnahmen liefern.

### **1.3 Untersuchungsziel**

In dem FuE-Vorhaben sollen die in vielen Einzelaufgaben erarbeiteten und für Erschütterungsgutachten genutzten Messdaten der BAW in Abhängigkeit vergleichbarer Parameter aufbereitet und für Prognosen zur Verfügung gestellt werden. Ziel dieser Untersuchungen ist ein experimentell gesichertes Prognoseverfahren für Bauwerks-, Bauteil- und Bodenerschütterungen im Umfeld von erschütterungsintensiven Baumaßnahmen um eine Verbesserung der Zuverlässigkeit, Schnelligkeit und Anwendungsbreite künftiger Erschütterungsprognosen zu erreichen.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Die gesammelten Erschütterungsmessdaten von Rammungen, Sprengungen, Meißel- und Verdichtungsarbeiten u. a. werden in Abhängigkeit vom Abstand zur Erschütterungsquelle, von der eingesetzten Energie, von Boden- und Bauwerkseigenschaften sowie gegebenenfalls von weiteren Einflussgrößen, wie z. B. Bohlenlänge und Rüttelfrequenz statistisch ausgewertet. Die vorliegenden Messdaten werden zusammen mit den vorhandenen Angaben aller relevanten Parameter elektronisch archiviert, systematisiert und statistisch ausgewertet. Das Problem der Erschütterungsausbreitung wird dabei in drei Teilkomplexen untersucht, der Erschütterungserzeugung (System Baumaschine-Boden), der Erschütterungsausbreitung (System Boden-Boden) und der Erschütterungsübertragung (System Boden-Bauwerk-Bauteil). Dabei sollen sowohl allgemeine Zusammenhänge (z. B. Bauwerkserschütterungen pro eingesetztem Energiebetrag in Abhängigkeit vom Abstand, unabhängig von Bauwerksart und Baugrund) als auch detaillierte Zusammenhänge (z. B. Erschütterung je Energiebetrag in Abhängigkeit vom Abstand für schwere massive Bauwerke in Sandböden) herausgearbeitet werden. Im ersten Fall erhält man über den Mittelwert und die Standardabweichung einen schnellen Überblick über die im Mittel und mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (z. B. 95 % und 99 %) maximal möglichen Erschütterungen auch ohne Kenntnis des aktuell vorhandenen Baugrundes. Im zweiten Fall können bei Kenntnis bestimmter Parameter des Bauwerks und des Baugrundes genauere

re Angaben mit reduziertem Streubereich erhalten werden. Beide Fälle sind für die praktische Arbeit sinnvoll und notwendig.

### 3 Ergebnisse

Statistische Aussagen für die Schwingungsausbreitung aller gängigen erschütterungsintensiven Bauverfahren an Wasserstraßen liegen bereits vor. Hierin sind enthalten Analysen für Schlagrammungen von Spundwandelementen (Dieselrammen, Hydraulikrammen, Schnellschlagbäre) und Rammpfählen (Franki-Verfahren), Vibrationsrammungen (mit variablen und starren Unwuchten im Drehzahlbereich  $f = 16 - 40$  Hz), Spundwandarbeiten mit hydraulischen Pressen, Meißelarbeiten (Abriss- und Felsmeißeln), Verdichtungsarbeiten (Rüttelplatten, Rüttelwalzen, Rüttelstopfverdichtung), Auflockerungssprengungen und Abbruchsprengungen sowie Erschütterungen aus Schiffsverkehr und herab fallenden Massen.

Um die durch regelmäßige Messungen ständig wachsenden Datenbestände besser handhaben zu können, wurde eine Software für die Erfassung, Analyse, Archivierung und Prognose von Erschütterungsdaten erarbeitet. Inzwischen liegt die 10. überarbeitete Version dieser Software vor. Es sind Module für Schlagrammungen, Vibrationsrammungen, hydraulische Pressen, Meißelarbeiten, Verdichtungsarbeiten, Sprengungen sowie Erschütterungen aus Schiffsverkehr und durch herabfallende Massen enthalten. Die Erfassung und Auswertung von Messdaten konnte damit insbesondere hinsichtlich der Korrelationen zu Verfahrens-, Boden- und Bauwerksparametern deutlich verbessert werden. Die Prognose der Schwingungsausbreitung ist damit sehr schnell und unter Heranziehung einer wesentlich größeren Datenbasis als bisher möglich. Für die Beurteilung der Mess- bzw. Prognosegrößen sind Rechenmodule für Vergleiche mit den Anhaltswerten aus der DIN 4150 integriert. Neben den Rechenmodellen mit numerischer Ausgabe der Ergebnisse für unterschiedliche Erschütterungsausbreitungen und Quellen können die berechneten Ergebnisse graphisch dargestellt werden. Für die Verarbeitung externer Daten wurde ein Modul für den Datenimport und Export programmiert. Bei der Bearbeitung der aktuellen Aufgaben stellt das oben beschriebene Programm bereits eine wertvolle Hilfe bei der Auswertung von Erschütterungsmessungen und der Erstellung von Prognosen dar.

Im Jahr 2010/2011 wurden im Rahmen der Bautätigkeit des WSV sieben Proberammungen durch Schwingungsmessungen begleitet, bei denen am jeweils gleichen Standort verschiedene Rammhilfen getestet wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass unter vergleichbaren Bedingungen (Rammelemente, Boden, Rammverfahren, Abstand) die Bodenschwingungen durch die Rammhilfen Vorbohren, Hochdruckvorschneiden und Niederdruckspülung nur sehr geringfügig (vernachlässigbar) beeinflusst werden. Im Bild 1 sind exemplarisch die Größtwerte der Bodenschwinggeschwindigkeit je Messpunkt und je gerammter Bohle bei Vibrationsrammung ohne Rammhilfe und mit Rammhilfe Vorbohren bei einer Proberammung dargestellt. Die Regressionskurven (Wellenausbreitung von Oberflächenwellen) bei der Verfahren liegen nahezu übereinander.

Mit den bisherigen Ergebnissen können Erschütterungsprognosen und die Auswirkungen von Erschütterungen für Planfeststellungsverfahren in vielen Fällen auch ohne kostenaufwändige Probemaßnahmen zuverlässig getätigt werden. Erschütterungsmessungen bei Bau- und Probemaßnahmen können mit Hilfe der entwickelten Software bereits vor Ort vorausgewertet werden so dass auf Anfragen von Ämtern zu Erschütterungsproblemen inzwischen wesentlich kurzfristiger reagiert werden kann.

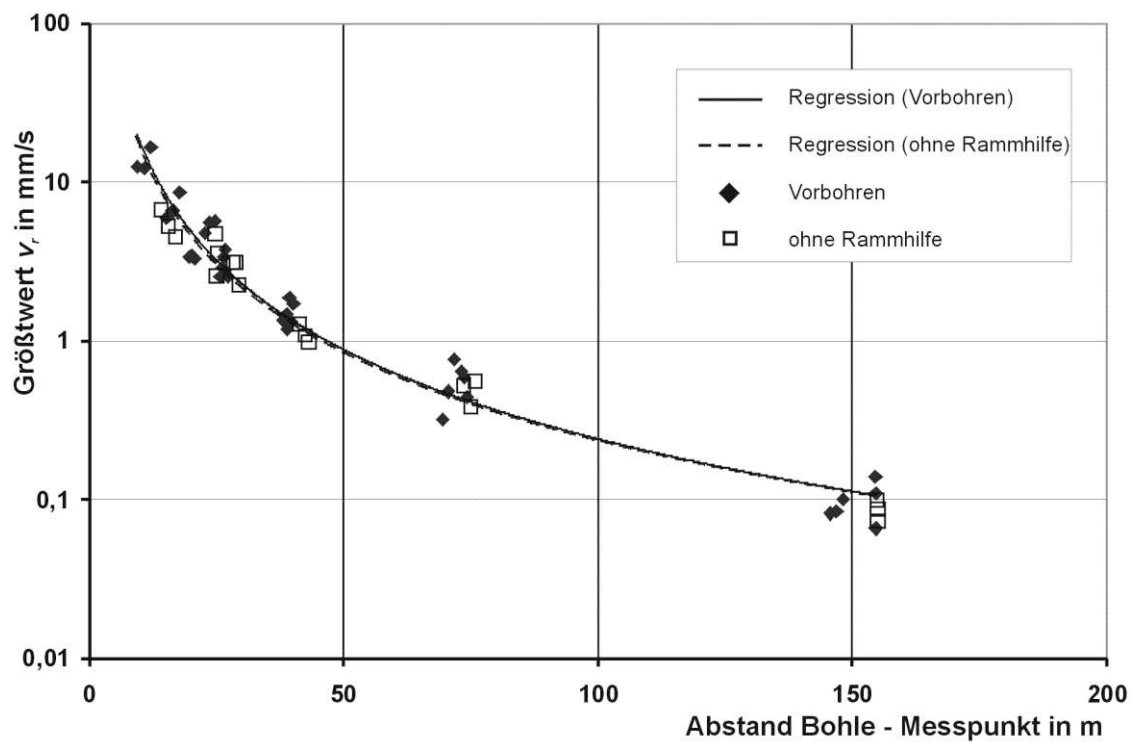


Bild 1: Größtwerte der Bodenschwingungen  $v_i$  je gerammter Spundbohle bei Vibrationsrammung

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Der Abschlussbericht wird in 2015 erstellt.

Laufzeit des Vorhabens: 2001 bis 2015.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

-/-



## **Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39530110036

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Schröder, Abt. Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flussbau (W2)

**E-Mail:** michael.schroeder@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In der mehrdimensionalen Modellierung von Fließgewässern wird die Modellähnlichkeit im Wesentlichen durch die Kalibrierung von Rauheitsparametern erzielt, die den Strömungswiderstand des Gewässerbettes parametrisieren. Während der Strömungswiderstand eines sandig-kiesigen Mittelwasserbettes relativ stringent aus der Sieblinie ermittelt werden kann, sind die Verhältnisse im Fall von über- und durchströmter Vegetation, die man außerhalb des Mittelwasserbettes im Bereich der Vorländer antrifft, wesentlich komplexer. Dies wird besonders deutlich an speziellen Eigenschaften von Pflanzen, wie Flexibilität unter Strömungsbelastung oder jahreszeitliche Veränderung der Belaubung. Darüber hinaus müssen für den Fall durchströmter Vegetation grundsätzlich andere Gleichungen als für den Fall überströmter Vegetation verwendet werden, da der Strömungswiderstand im ersten Fall mit steigendem Abfluss zunimmt, während er im zweiten Fall abnimmt.

In den 80er-Jahren des 20. Jahrhunderts wurden im Rahmen eines DFG-Schwerpunktprogramms umfangreiche Forschungen initiiert, die sich genau mit diesem Problem - dem Strömungswiderstand von durchströmter Vegetation - befassten. Die Ergebnisse der Forschung mündeten in dem DVWK-Merkblatt 220 („Hydraulische Berechnung von Fließgewässern“, 1991). Mit dem Abschluss des DFG-Schwerpunktprogramms wurden aufgrund der bereits angesprochenen Komplexität des Themas bei Weitem nicht alle Forschungsziele erreicht, so dass sich bis heute zahlreiche Forschungsarbeiten mit dem Strömungswiderstand von Pflanzen beschäftigen. Hierbei stehen häufig Teilaspekte im Vordergrund, wie Flexibilität von Pflanzen oder neue Berechnungsansätze für über- und durchströmten Bewuchs, während sich andere Arbeiten mit der Katalogisierung von Vegetationsformen und deren Fließwiderstandsverhalten sowie mit der Erfassung von Bewuchsformen mithilfe der Fernerkundung beschäftigen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

In der Planung und Durchführung von Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen an den frei fließenden und staugeregelten Bundeswasserstraßen sowie bei der Bewertung von Baumaßnahmen Dritter sind auch immer Hochwasserabflüsse zu betrachten, bei denen häufig dicht bewaldete Vorlandflächen das Abflussgeschehen dominieren. Die möglichst genaue rechnerische Berücksichtigung des Strömungswiderstands der Vegetation über ein weites Spektrum von Abflusszuständen ist bedeutend für die Ermittlung von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten und folglich für die Abschätzung von morphodynamischen Prozessen (Geschiebetransport, Sohlstabilität und Fehlstellenentwicklung). Insbesondere in den folgenden drei Situationen ist die Verwendung von physikalisch-wissenschaftlich fundierten Berechnungsansätzen zur Ermittlung des Strömungswiderstands von Pflanzen zwingend erforderlich:

- Die Kalibrierung eines Strömungsmodells erfordert für den Lastfall Hochwasserabfluss auch entsprechende Naturmessdaten. Im Bereich von extremen Hochwasserabflüssen sind allerdings Naturmessdaten nur spärlich oder überhaupt nicht verfügbar, so dass häufig mit dem bei niedrigeren Abflüssen kalibrierten Strömungsmodell eine Extrapolation auf extreme Hochwasserstände erfolgen muss.
- Bei der instationären Strömungsmodellierung einer Hochwasserganglinie variiert der Strömungswiderstand von durch- und überströmter Vegetation in einem sehr weiten Bereich und kann mit konstanten Beiwerten der einfachen Fließgesetze nach Manning-Strickler, Nikuradse usw. nicht mehr beschrieben werden.
- Die planerischen Maßnahmen Dritter, die beispielsweise als Ausgleichsmaßnahmen im Vorlandbereich durchgeführt werden sollen, sind hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Belange der

Schifffahrt sowie der Gewässerunterhaltung zu bewerten. Solche Maßnahmen haben häufig den Hochwasserschutz oder ökologische Aufwertungen zum Ziel (z. B. Veränderung des Hochwasserquerschnitts durch die Rückverlegung von Deichen oder Anbindung von nicht durchströmten Altarmen bzw. Anpflanzung oder Tolerierung einer auetypischen Vegetation). Eine Kalibrierung von Rauheitsparametern zur Beschreibung des Strömungswiderstands von Vegetation ist bei planerischen Maßnahmen vom Grundsatz her nicht möglich.

### **1.3 Untersuchungsziele**

Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Vorlandvegetation“ verfolgt die Ziele:

- Methoden zur Erfassung, Beschreibung und Parametrisierung der Vegetation zusammenzustellen und hinsichtlich der praktischen Eignung für den Bereich der Bundeswasserstraßen zu bewerten und zu erproben,
- Berechnungsverfahren gemäß dem aktuellen Stand der internationalen Forschung bereitzustellen und ggf. weiterzuentwickeln, die im Rahmen der mehrdimensionalen mathematisch-numerischen Modellierung zur Berücksichtigung des Widerstandsverhaltens durch- und überströmter Vorlandvegetation geeignet sind und
- typische Vegetationsformen im Vorlandbereich der Fließgewässer zu katalogisieren.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Aufgrund der zahlreichen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Strömungswiderstands von Vegetation werden die verfügbaren Forschungsergebnisse in einem ersten Schritt und dann weiterhin kontinuierlich aus der einschlägigen Literatur entnommen. Auf der Grundlage dieser Literaturanalyse erfolgt im zweiten Schritt die Identifikation des heutigen Forschungsbedarfs. Hierbei steht die anwendungsorientierte Forschung im Vordergrund, deren Ergebnisse möglichst unmittelbar zur Qualifizierung der in der BAW eingesetzten mehrdimensionalen Berechnungsverfahren verwendet werden können. Eher grundlagenorientierte Forschungsarbeiten werden gefördert, beispielsweise durch die Kooperation mit Forschungsinstituten der Universitäten und Hochschulen. Durch eigene Aufträge an Forschungseinrichtungen wird die Durchführung von Modellversuchen in Wasserbaulaboratorien und von Naturversuchen im Bereich der Bundeswasserstraßen vergeben. Mit diesen Forschungsergebnissen erhält die BAW eine Datengrundlage, die unmittelbar zur weiteren Qualifizierung der eigenen Modellverfahren eingesetzt werden kann.

### **3 Ergebnisse**

Das Projekt war fachlich zum Ende des Jahres 2014 abgeschlossen. Zu diesem Zeitpunkt fehlte der Abschlussbericht des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen noch, so dass sich der technische Abschluss bis zum Ende des Jahres 2015 verzögerte. Eine Gesamtübersicht der durchgeführten Arbeiten ist dem nun vorliegenden BAW-Abschlussbericht zu entnehmen.

### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Laufzeit des Vorhabens: 2000 bis 2015.

### **5 Literatur**

-/-

### **6 Veröffentlichungen**

BAW (2014): Hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchung zur aktuellen Genehmigungsplanung der Nebenrinne und Auewaldpflanzung im Bereich des Emmericher Wards; Modelluntersuchungen im Rahmen des "Declaration of Support" für das LIFE+ Projekt Emmericher Ward in Kooperation mit dem NABU; BAW-Gutachten.

- BAW (2016): FuE-Abschlussbericht - Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen; A39530110036.
- Brockmann, H.; Haase, A.; Mandlbürger, G.; Schröder, P.M. (2010): LIDAR-Datenpotenziale für hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen; 30. Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der DGPF; Dreiländertagung, Wien 2010; Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.
- Eisenhauer, N., Sommer, C. (2003): Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen; Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Wasserbau der Fachhochschule Karlsruhe – Hochschule für Technik.
- Eisenhauer, N.; Sommer, C. (2004): Laborversuche in der Versuchsanstalt für Wasserbau der FH-Karlsruhe; Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Wasserbau der Fachhochschule Karlsruhe – Hochschule für Technik.
- Hänssig, P.A. (2008): Einfluss von Auenwaldvegetation auf die Strömungsverhältnisse an Bundeswasserstraßen - 2D-tiefengemittelte hydrodynamisch numerische Simulation durchströmter Vorlandvegetation am Beispiel des Rheinabschnittes Wesel; Diplomarbeit.
- IWW, Valitec (2015): Einfluss von Vegetation auf den Vorlandabfluss - Hydrografische und hydrometrische Untersuchung von Vorländern des Rheins bei Langel (Rhein-km 672), Perrich (Rhein-km 817) und Emmerich (Rhein-km 855). Bericht des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (RWTH Aachen) und des Ingenieurbüros valitec simulations.
- Kowalski, R.L.; Schröder, P.M. (2006): Pflanzen in der 2D Simulation von Flüssen; Wasserbaukolloquium 2006: Strömungssimulation im Wasserbau, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 32.
- Servouse, P. (2015): Modelluntersuchungen technisch-biologischer Ufersicherungen in der Versuchsstrecke Worms; Bachelorarbeit an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft.
- Wenka, T.; Schröder, P.M. (2004): Unsicherheiten bei der Abbildung von 3D-Effekten in der Hochwasserabschätzung mit 2D-tiefengemittelten Berechnungsverfahren; Wasserbauliche Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, Heft 27; ISBN 3-86005-414-7.

## **Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau**

**Netzplan-Nr.:** A39530110064

**Projektleiterin:** Dr.-Ing. R. Kopmann, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

**E-Mail:** rebekka.kopmann@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei den durch die BAW durchgeführten Untersuchungen zur Wirkungsweise flussbaulicher Maßnahmen muss zunehmend die morphodynamische Flussentwicklung einbezogen werden. Mehrdimensionale numerische Feststofftransport-Modelle (FT-Modelle) finden zunehmend Anwendung zur Lösung von instationären, großskaligen Problemen, da sie bereits einen beachtlichen Entwicklungsstand erreicht haben. Allerdings setzt eine erfolgreiche Anwendung dieser Verfahren ein grundlegendes Verständnis der physikalischen Phänomene sowie große Erfahrung in der numerischen Modellierung voraus. Dies ist bedingt durch die Vielfalt und enorme Komplexität der morphodynamischen Phänomene (insbesondere durch Rückkopplungsprozesse zwischen Strömung und sich umlagernder Sohle) und durch deren phänomenspezifische Beschreibung mittels semi-empirischer Gleichungen. Während die Überprüfung von rein hydrodynamischen Modellsystemen an analytischen Lösungen durchgeführt werden kann, fehlen diese für komplexere morphodynamische Prozesse. Die Zuverlässigkeit dieser Modellklasse ist daher an die Verifikation und Validierung durch Fallstudien und an die Erfahrung des Programmentwicklers und -anwenders gebunden. Verifikation, Validierung und Kalibrierung der Modelle müssen daher sehr sorgfältig und ausführlich durchgeführt werden. Für die BAW ist der Nachweis der Anwendbarkeit und der Grenzen für die praxisrelevanten Fragestellungen zu erbringen. Zentral ist dabei die Frage, mit welcher Sicherheit FT-Modelle bei welchen Fragestellungen zur Prognose von Sohlentwicklungen eingesetzt werden können.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Der Einsatz von prognosesicheren, auf die Fragestellungen der WSV zugeschnittenen FT-Modellen sichert die effiziente und qualitativ hochwertige Bearbeitung von Projekten mit morphodynamischen Fragestellungen. Als Ergänzung zu Naturuntersuchungen und gegenständlichen Modellen ist dieses Werkzeug optimal geeignet, die räumliche und zeitliche Wirkung vieler verschiedener Einflussgrößen mittels Szenarienrechnungen aufzuzeigen. Dies ist insbesondere im Zusammenhang mit Langzeitprognosen hilfreich und verbessert die Bewertung von Maßnahmen und deren Qualitätskontrolle.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des Projektes ist es, die Eignung numerischer FT-Modelle zur Abbildung grundlegender morphologischer Prozesse anhand von Messungen aus Labormodellen zu beurteilen. Als Ergebnis werden Weiterentwicklungspotenziale sowie eine beschleunigte Einführung dieser Modelle im Rahmen der Projektarbeit erwartet. Dafür werden folgenden Untersuchungsschwerpunkte verfolgt:

- Untersuchungen an Labormodellen mit beweglicher Sohle für die Herstellung von geeigneten Messdatensätzen zur Standard-Verifikation von FT-Modellen.
- Validierung bestehender FT-Modelle anhand geeigneter Messdatensätze. Ziel ist es, die Anwendbarkeit und Grenzen der Modelle aufzuzeigen. Dazu gehört auch die Einschätzung der erreichten Genauigkeit mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung.
- Weiterentwicklung bestehender FT-Modelle in Zusammenarbeit mit Universitäten.

### **2 Untersuchungsmethoden**

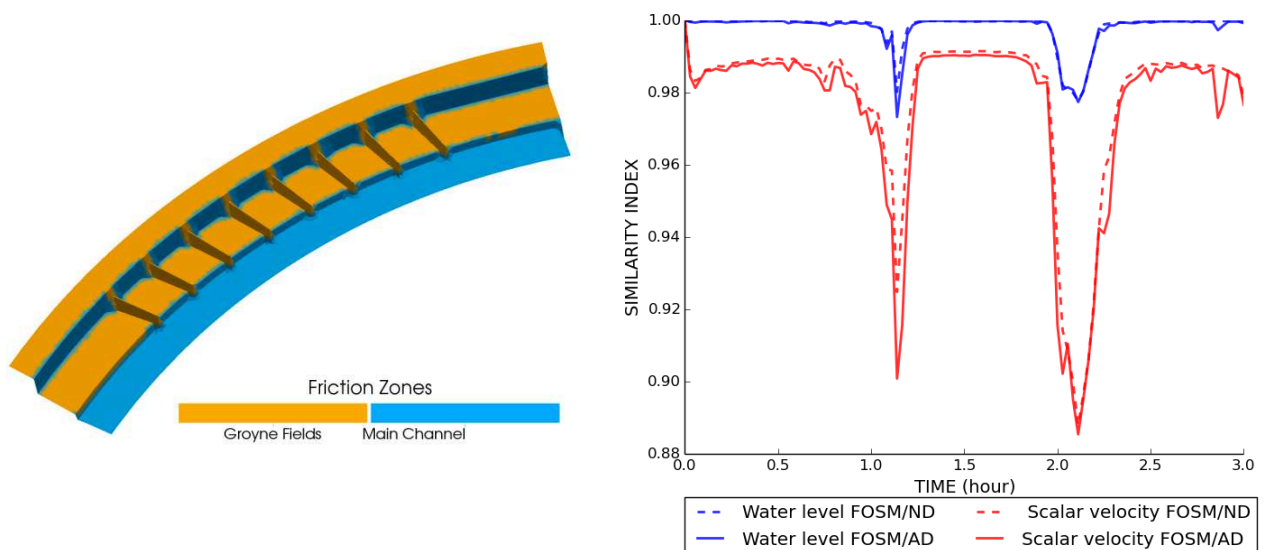
Im Jahr 2015 wurde der Schwerpunkt auf die Einschätzung der Genauigkeit von FT-Modellen gelegt. Dafür wurden die bisher verwendeten vier Zuverlässigkeitsmethoden und eine neue Methode an einem Projektbeispiel aus dem Flussbau verglichen. Mit Hilfe der Zuverlässigkeitsmethoden kann der

Einfluss von unsicheren Eingangsparametern, wie z.B. die Rauheitsbeiwerte in verschiedenen Zonen, auf die berechneten Wasserspiegellagen, Geschwindigkeiten und Sohllagen quantifiziert werden.

### 3 Ergebnisse

Im Rahmen einer Masterarbeit (Mai, 2015) wurden fünf Zuverlässigkeitsmethoden auf die numerische Modellierung eines Labormodells mit Buhnen und eines 10 km langen Rheinabschnitts bei Düsseldorf angewendet und verglichen. Beide Modelle wurden mit dem Programmsystem Telemac ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)) simuliert. An dem Buhnenmodell wurde der Einfluss der Rauheitsbeiwerte von zwei Zonen auf die Wasserspiegellagen und die Geschwindigkeiten abgeschätzt. Im Rheinmodell wurde der Einfluss von insgesamt 15 Parametern, davon fünf Rauheitsbeiwerte und zehn Kornklassen für die Abbildung des Sohlmaterials auf die Sohländerungen berechnet. Für alle unsicheren Parameter wurde eine Normalverteilung angenommen. Die Mittelwerte entstammen einer vorherigen Kalibrierung (Hentschel, Anlauf, 2001, Backhaus et al., 2014) und die Standardabweichung wurde auf 10 % des jeweiligen Mittelwertes festgesetzt. Zum Einsatz kamen die lineare Zuverlässigkeitsmethode First Order Second Moment, wobei die dafür notwendigen Gradienten einmal numerisch (FOSM/ND) und einmal mit Hilfe eines algorithmisch differenzierten Programmcodes von Telemac (FOSM/AD) berechnet wurden, sowie die nicht-lineare Monte-Carlo (MC) Methode und die PCE (Polynomial Chaos Expansion) Methode.

Bild 1 (links) zeigt das Buhnenmodell mit seinen Rauheitszonen. Der Vergleich der linearen Methoden FOSM/ND und FOSM/AD zu der nichtlinearen MC Methode über die Simulationszeit einer künstlichen Hochwasserwelle von drei Stunden ist in Bild 1 (rechts) abgebildet. Der dargestellte über das Gebiet gemittelte Ähnlichkeitsindex variiert zwischen null und eins, wobei eins eine vollständige Übereinstimmung und null eine größere Abweichung als 1 mm bei der Berechnung der Sensitivität für den Wasserstand bzw. 1mm/s für die Geschwindigkeiten anzeigt. Beide FOSM Methoden zeigen nahezu identische Ergebnisse, so dass gefolgert werden kann, dass die Art der Berechnung des Gradienten hier keinen Einfluss hat. Die schlechtesten Übereinstimmungen sind genau zu den Zeitpunkten, wenn der Wasserspiegel etwa auf Buhnenkopfhöhe ist. Bekanntermaßen ist dieser Zeitpunkt numerisch labil durch das Trockenfallen und Wiederbenetzen der Knoten und möglichen schießendem Abfluss. Insgesamt ist die Übereinstimmung der linearen zu der nicht-linearen Methode aber so gut, dass es die Verwendung der zu FOSM/AD etwa 250-fach rechenintensiveren nicht-linearen Methode nicht rechtfertigt.

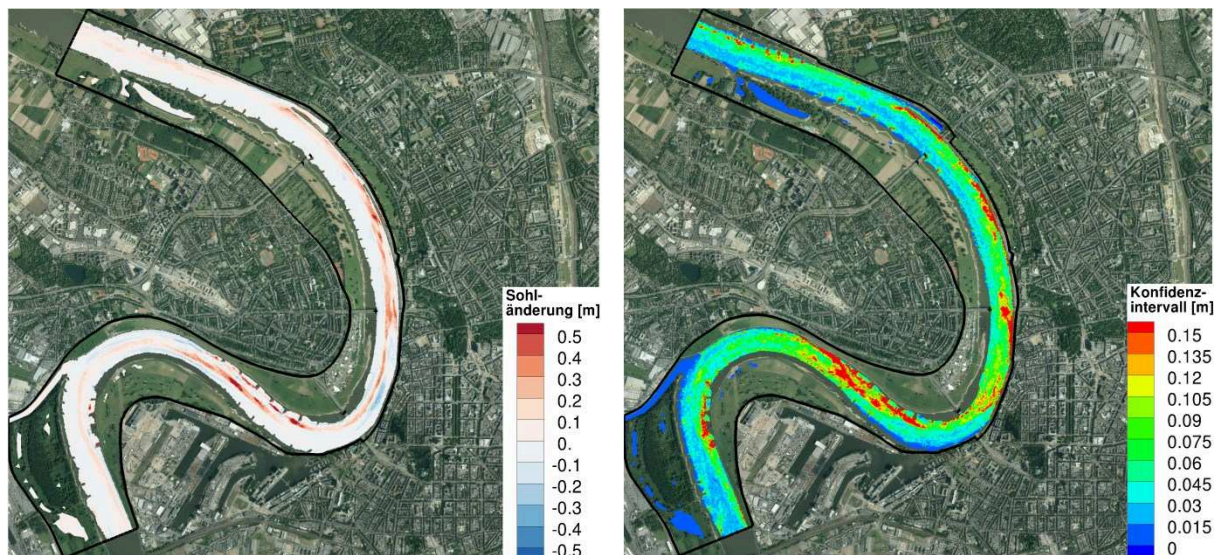


**Bild 1:** Geometrie des Buhnenmodells und die verwendeten Rauheitszonen (links), Vergleich der linearen Zuverlässigkeitsmethoden FOSM/ND und FOSM/AD mit der nichtlinearen Monte Carlo Methode (rechts)

Bild 2 links zeigt die simulierten Sohländerungen nach einer synthetischen Hochwasserwelle von 25 Tagen, wobei für alle 15 unsicheren Eingangsparameter die Mittelwerte verwendet wurden. Auf der rechten Seite sind die korrespondierenden Konfidenzintervalle infolge der angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilung der unsicheren Eingangsparameter.

Die großen Konfidenzintervalle zwischen den beiden Krümmungen sind durch die im Simulationszeitraum räumlich variierende Lage der Furt verursacht. An den steilen rechten Ufern in der Stadtstrecke Düsseldorf haben Umlagerungen im Querschnitt einen großen Einfluss auf die berechneten Sohländerungen. Zudem führen die großen Gradienten im Wasser-Land-Übergang oftmals zu numerischen Schwierigkeiten. Die Größe der Konfidenzintervalle an den Außenufern ist somit auch numerisch bedingt.

Es ergeben sich mit der Zuverlässigkeitsanalyse, wie hier beispielhaft gezeigt, Auswertemöglichkeiten, die in den künftigen Projektalltag der Feststofftransportmodellierung integriert werden sollen.



**Bild 2:** Berechnete Sohländerungen infolge einer synthetischen Hochwasserwelle von 25 Tage einer 10 km langen Rheinstrecke bei Düsseldorf (links), Konfidenzintervall (95%) der berechneten Sohländerungen infolge von 15 unsicheren Eingangsparametern (rechts)

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Arbeiten in dem Forschungsvorhaben konnten in 2015 abgeschlossen werden und wurden in einem Abschlussbericht zusammengefasst.

Laufzeit des Vorhabens: 2002 bis 2015.

#### 5 Literatur

- Backhaus, L., Brudy-Zippelius, T., Wenka, T., Riesterer, J. (2014). Comparison of morphological predictions in the Lower Rhine River by means of a 2-D and 3-D model and in situ measurements. Proceedings of River Flow conference, Lausanne.
- Hentschel, B., Anlauf, A. (2001). Ökologische Untersuchungen of Buhnen in der Elbe. in: Weitbrecht, V., Mazijk, A.V. (eds) report for Workshop at UFZ Leipzig-Halle. Magdeburg, 22./23.10.2001, pp 121-133, Technical University Delft, University of Karlsruhe.

## 6 Veröffentlichungen

BAW (2015): Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau. Abschlussbericht zum FuE-Projekt A39530110064, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat W5, Januar 2016.

Mai, T.H., Kopmann, R., Nowak, W. (2015). Using Algorithmic Differentiation for uncertainty analysis. Proceedings Telemac-Mascaret User Conference 2015.

Mai, T.H. (2015). Application of reliability analysis methods to a numerical model of river Rhine. Masterthesis University of Stuttgart.



## **Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes**

**Netzplan-Nr.:** A39530170001

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Schröder, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Flussbau (W 2)

**Bearbeiter:** Dr.-Ing. S. Wurms, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Flussbau (W 2)

**E-Mail:** michael.schroeder@baw.de, sven.wurms@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Abflussprojektionen für den Rhein, zeigen, dass als eine Auswirkung des Klimawandels die Häufigkeit und Dauer extremer Abflussverhältnisse in der fernen Zukunft (Jahre 2071 bis 2100) zunehmen könnten. Bei extremen Niedrigwasserabflüssen ist eine zunehmende Beeinträchtigung der Schifffahrt festzustellen, wie dies beispielsweise während des Niedrigwassers 2003 zu beobachten war. Einerseits reduziert sich in solchen Fällen die maximal mögliche Abladetiefe, was unmittelbare Folgen für die Wirtschaftlichkeit des Transports per Schiff hat. Andererseits kommt es aber auch zu Breitereinschränkungen, die durch Untiefen in der Fahrrinne verursacht werden. Betroffen hiervon wären die Sicherheit und Leichtigkeit, mit der die Schifffahrt dann noch in Engpassbereichen zu navigieren vermag.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zur Identifikation von Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels bedarf es des Wissens um die Sensitivität des Gesamtsystems Wasserstraße, insbesondere der hydro- und morphodynamischen Komponenten gegenüber veränderten hydrologischen Eingangsgrößen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens KLIWAS werden durch Anwendung eines Multimodellansatzes erstmalig belastbare Abflussprojektionen bis zum Jahr 2100 an den Hauptpegeln des Rheins in Form von Ergebnisbandbreiten generiert. Die Systemsensitivität gilt es daher konsequenterweise für die gesamte Bandbreite möglicher zukünftiger Abflussänderungen zu untersuchen. Dies wird zunächst exemplarisch an der Pilotstrecke Mainz bis St. Goar (Rhein-km 493,0 bis 557,5) durchgeführt.

2D-morphodynamische Berechnungen über die gesamte Länge der Pilotstrecke befinden sich heute im Bereich des technisch realisierbaren, jedoch sind Langzeitsimulationen, wie sie vor dem Hintergrund des Themas Klimawandel erforderlich sind, bisher nur mit deutlichen Abstrichen bezüglich der möglichen Feinheit der Modelldiskretisierung durchzuführen. In diesem Zusammenhang sind geeignete Strategien zu identifizieren, mit welchen morphodynamische Langzeitsimulationen in hinreichender Prognosequalität bei vertretbaren Rechenzeiten auf den zur Verfügung stehenden Großrechnern realisierbar sind.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Aus dem Projekt resultieren Aussagen, mit welchem Aufwand, welche Verbesserungen für die Schifffahrt bei klimabedingt möglicherweise reduzierten Niedrigwasserständen erzielt werden können. Damit stehen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) frühzeitig Anpassungsoptionen als Antwort auf die Auswirkungen eines möglichen Klimawandels zur Verfügung, mit welchen die Leistungsfähigkeit des Transportträgers Binnenschifffahrt auch bei extremen Niedrigwasserabflüssen erhalten werden kann. Erkenntnisse, welche aus den Modelluntersuchungen resultieren, sowie die im Rahmen dieses Projekts generierten, kalibrierten und validierten Modelle wurden parallel in dem WSV-Projekt „Abladeoptimierung Mittelrhein“ eingesetzt.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel dieses Projektes ist es, mögliche verkehrswasserbauliche Anpassungsoptionen zu identifizieren und zu bewerten, mit denen in Niedrigwasserperioden Mindestfließtiefen in freifließenden Wasserstraßen über längere Zeiträume als heute garantiert werden können. Auf einer Schwachstellenanalyse aufbauend werden erforderliche Ausbaumaßnahmen konzipiert und hinsichtlich ihrer Eignung bewer-



tet. Abschließend ist der Unterhaltungs- und Regelungsaufwand hinsichtlich des Gewinns für die Schifffahrt zu ermitteln.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen im Rahmen des Projektes werden exemplarisch für die Pilotstrecke von Mainz bis St. Goar (Rhein-km 493,0 bis 557,5) durchgeführt. Einer Analyse des heutigen Ausbauzustandes der Wasserstraßen mit Hilfe des 2D-hydro-/morphodynamischen Modellierungssystems TELEMAC-2D/Sisyphe folgt die Planung und Bewertung verschiedener Optionen eines Niedrigwasserausbaus.

Klimabedingte Änderungen der Niedrigwasserabflüsse fließen in Form von Bandbreiten projizierter Änderungen an den Haupt- und Nebenpegeln in eine hydrodynamische Sensitivitätsuntersuchung ein, anhand derer die abflussabhängige Entwicklung der Engpassbereiche innerhalb der Pilotstrecke abgeschätzt wird. Für den Pegel Kaub wird eine Änderung der für Ausbau und Unterhaltung der Wasserstraße relevanten Niedrigwasserkenngroße GIQ von +15 % bis -5 % in der nahen Zukunft (Jahre 2021 bis 2050) erwartet. Die Projektionen für die ferne Zukunft (Jahre 2071 bis 2100) zeigen Änderungen des GIQ von -10 % bis -25 % (Nilson et al., 2013). Im Rahmen morphodynamischer Modellrechnungen wird der zukünftige, klimabedingt veränderte Unterhaltungsaufwand in Form von Baggermengen zum Erhalt des Status quo der Wasserstraße sowohl für ein Null-Szenario ohne Klimaänderungen als auch für klimabedingt veränderte Randbedingungen abgeschätzt (Wurms, S., Schröder, M. 2013). Hierfür werden für die Zeiträume der nahen und fernen Zukunft insgesamt 13 instationäre Abflussprojektionen verwendet, welche sich jeweils über 30 Jahre erstrecken. Auf Grundlage der hydraulischen und morphologischen Streckenanalyse werden die Abschnitte identifiziert, die bei den einzelnen Niedrigwasserszenarien zu Engpassstellen für die Schifffahrt werden und in welchen Regelungsmaßnahmen erforderlich sind, um den Unterhaltungsaufwand zur Aufrechterhaltung der Fahrrinntiefen zu minimieren.

Damit die Leistungsfähigkeit der Binnenschifffahrt auch bei extremen Niedrigwasserabflüssen erhalten bleibt, ist der Ausbau der Wasserstraßen in Form einer durchgehenden, gegebenenfalls breitenreduzierten Niedrigwasserfahrrinne unter Ausnutzung vorhandener Übertiefen erforderlich. Die Lage und Mindestbreite dieser Fahrrinne wird im Rahmen des KLIWAS-Projekts 4.04 „Ermittlung von Fahrrinnenmindestbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt“ ermittelt. Mit dieser bautechnischen Variante werden hydro- und morphodynamische Berechnungen durchgeführt, um die Unschädlichkeit der Baumaßnahmen hinsichtlich eines Wasserspiegelverfalls im Bereich von Niedrig- bis Mittelwasserabfluss nachzuweisen sowie Verlandungs- oder Erosionsprobleme zu erkennen. Zusätzlich zu untersuchende Regelungsmaßnahmen sind neben den üblichen Buhnen und Parallelwerken flexible, nur bei Niedrigwasserabflüssen wirkende Buhnen und Schwellen (Wurms, S., Schröder, M. 2011).

Zur erforderlichen Beschleunigung der morphodynamischen Simulationen unter Beibehaltung der Ergebnisgenauigkeit wird die Technik des morphologischen Faktors auf die Erfordernisse des instationär betriebenen Modells angepasst, welche sonst im Zusammenhang morphodynamischer Simulationen unter Verwendung stationärer oder periodischer Randbedingungen eingesetzt wird (Wurms, S., Schröder, M. 2012).

## 3 Ergebnisse

Die Untersuchung der potenziellen Wassertiefen innerhalb der Fahrrinne unter Verwendung des Status Quo der Wasserstraße zeigt, dass in der Pilotstrecke Mainz bis St. Goar mit einer Verschärfung der Engpassituation im Falle sinkender Niedrigwasserabflüsse zu rechnen ist. Während bis zu einer Verringerung des GIQ um 10 % aufgrund der vorhandenen Tiefenreserven in der Fahrrinne überwiegend ein Anwachsen der Volumina der bereits existierenden Fehlstellen zu erwarten wäre, würden bei einer weiteren Verringerung zahlreiche neue Fehlstellen in bislang unkritischen Fahrrinnenbereichen auftreten.

Die morphodynamischen Berechnungen zeigen, dass in der nahen Zukunft keine eindeutige Tendenz zur Erhöhung oder Verringerung der Unterhaltungsbaggermengen vorliegt, sollten die heutigen Fahrrinntiefen zukünftig aufrechterhalten werden. In der fernen Zukunft ist tendenziell mit einer Erhöhung der Unterhaltungsbaggermengen sowohl innerhalb des Geschiebefangs als auch der Fahrrinne

zu rechnen. Die maximale projizierte Zunahme der Baggermengen innerhalb der Fahrrinne beträgt dabei +196 %. Ursächlich für den Anstieg der Baggermengen sind die folgenden Aspekte: Je ausgeprägter die Verringerung des aus den jeweiligen Abflussprojektionen resultierenden GIQs und damit des für die Baggerungen relevanten Bezugswasserstands ist, desto größer fällt die Erhöhung der Baggermengen aus. Deutlich wird weiterhin der Zusammenhang zwischen erhöhten Abflusskennwerten für Mittel- und Hochwasser der Abflussprojektionen einerseits und einem Anstieg der erforderlichen Unterhaltungsmengen infolge des erhöhten Sedimenteintrags in die Strecke sowie einer erhöhten Sedimentdynamik andererseits.

Die verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen dienen dazu, den projizierten klimabedingten Mehraufwand auszugleichen, der zur Aufrechterhaltung der heutigen Fahrrinntiefen erforderlich wäre. Die Wirksamkeit der bislang im Rahmen der hydrodynamischen Modellierung identifizierten verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen wurde im 2D-morphodynamischen Modell untersucht. Als Randbedingung diente diejenige Abflussprojektion aus der fernen Zukunft, mit welcher der mit einem Wert von +196 % größte Anstieg der Unterhaltungsmengen innerhalb der Fahrrinne projiziert wurde. Eine mögliche Anpassungsoption ist die abgestufte Unterhaltung der Fahrrinne, d. h. einer auf reduzierter Breite durchgeführten Anpassung der Fahrrinne an den im Rahmen der genannten Abflussprojektion reduzierten Bezugswasserstand. Weiterhin wurden im morphodynamischen Modell Längswerke in den Bereichen Oestrich und Kemptener Fahrwasser untersucht, welche auf die Erhöhung der Schubspannungen und damit eine Verringerung der Anlandungsraten abzielen.

Durch die abgestufte Unterhaltung der Fahrrinne könnte eine deutliche Verringerung des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes erzielt werden. Im betrachteten Szenario ließe sich der klimabedingte Anstieg der Baggermengen in der Fahrrinne zwischen Mainz und Trechtingshausen von insgesamt +196 % auf einen Wert von +122 % reduzieren. In Teilbereichen der untersuchten Strecke, z. B. der Teilstrecke Bingen, ließe sich durch die abgestufte Unterhaltung die klimabedingte Zunahme des Unterhaltungsaufwandes nahezu ausgleichen. In anderen Teilstrecken wäre die Wirkung teils weniger ausgeprägt. Hinsichtlich der Verringerung des klimabedingten Mehraufwands an Unterhaltung ist somit denkbar, die Anpassungsoption der abgestuften Unterhaltung der Fahrrinne auf ausgewählte Engpassbereiche zu begrenzen.

Durch ein Längswerk im Bereich der Rüdesheimer Aue ließe sich der klimabedingte, projizierte Mehraufwand an Unterhaltung in der Teilstrecke Bingen von +137 % auf einen Wert von +69 % reduzieren und somit nahezu halbieren. Eine Kombination aus abgestuft unterhaltener Fahrrinne einerseits und Längswerken in den Bereichen Oestrich und Rüdesheimer Fahrwasser andererseits würde insgesamt zu einer Verringerung der projizierten Zunahme des Unterhaltungsaufwands von +196 % auf einen Wert von +88 % führen. In einzelnen Teilstrecken könnte die klimabedingte Zunahme des Unterhaltungsaufwandes vollständig ausgeglichen werden.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Laufzeit des Vorhabens: 2009 bis 2015.

#### **5 Literatur**

Nilson, E.; Carambia, M.; Klein, B.; Krahe., P. (2013): Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime und die Binnenschifffahrt im Rheingebiet. Koblenz, 2013. – BfG-Bericht, in Vorbereitung.

#### **6 Veröffentlichungen**

Wurms, S., Schröder, M. (2011): Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen. In: BMVBS (2011): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, Tagungsband zur 2. Statuskonferenz, 25. – 26. Oktober 2011, Berlin.

Wurms, S., Schröder, M. (2012): Evaluation of strategies for the acceleration of morphodynamic simulations against the background of waterways maintenance. In Murillo (Hrsg.), River Flow 2012, S. 1235 - 1241. San José, Costa Rica.

Wurms, S., Schröder, M. (2013): 2-D-morphodynamische Simulationen zur Anpassung des Verkehrswasserbaus an den Klimawandel. In: WasserWirtschaft 103 (2013) Nr. 12, S. 16-21.

Schröder, M., Wurms, S. (2014): Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.03. KLIWAS-45/2014. BAW / BfG, Koblenz. ([http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_45\\_2014\\_4.03.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_45_2014_4.03.pdf))

## **Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39530170003

**Projektleiter:** Dr.-Ing. T. Wenka, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

**E-Mail:** thomas.wenka@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Morphologische Betrachtungen sind aufgrund der ausgedehnten Beobachtungszeiträume überwiegend großräumig und langfristig angelegt. Die Analyse der bettbildenden Prozesse bedarf infolge des intensiven Zusammenspiels bathymetrischer, granulometrischer und strömungsmechanischer Effekte wiederum einer zeitlich und räumlich hoch auflösenden Betrachtungsweise. Obwohl die mikro- bis mesoskaligen Strömungsprozesse aufgrund der Turbulenz weitgehend stochastischer Natur sind, kommen in der Strömungsmodellierung vorrangig deterministische Methoden zum Einsatz mit dem Ziel, die integralen Prozesse anhand statistisch mittlerer Werte gut abbilden zu können. Der als Bewegungsbeginn der Sohle bezeichnete Grenzzustand ist ein in der numerischen Modellierung des Sedimenttransports und der Evolution der Stromsohle maßgeblicher Parameter. Von der „Belastungsseite“ kommend, ist es die transportwirksame Sohlschubspannung, die es modelltechnisch zu erfassen gilt. Von der „Widerstandsseite“ aus betrachtet, sind es die Oberflächen- bzw. Formrauheit und die Beschaffenheit der Kornmatrix, die in Bezug auf den Bewegungsbeginn eine entscheidende Rolle spielen. Dreidimensionale Wirbelstrukturen der Strömung, die sich markant im Nahbereich von Regelungsbauwerken und in Gerinnekrümmungen ausprägen, wirken sich primär durch ihren Einfluss auf die sohnahen Strömungsgeschwindigkeiten und die daran gekoppelten Sohlschubspannungen auf die bettbildenden Prozesse aus. Während die Strömungsseite in numerischen Modellen für morphologische Fragestellungen durch Wahl einer entsprechenden Skala mit ausreichender Genauigkeit abgedeckt werden kann, ist es die Sohlseite mit all ihren Unwägbarkeiten, die aufgrund der schwachen Datenlage zu den allseits bekannten Unsicherheiten in der Prognose führt. Eine genauere Betrachtung der die Widerstandsseite der Sohle betreffenden Prozesse ist für dieses Projekt zu umfangreich. Vielmehr geht es vorrangig darum, die Wertigkeit dreidimensionaler Strömungseffekte als Einflussgrößen der Feststofftransportmodellierung besser beurteilen zu können. Um Aufwand und Nutzen 2D-tiefengemittelter oder dreidimensionaler Modelle besser abwägen zu können und deren Prognosefähigkeit zu erhöhen, ist es im Rahmen dieses Forschungsvorhabens angebracht, die Schnittstelle zwischen Strömung und Sohle genauer zu betrachten. Vor diesem Hintergrund bildet die Evaluierung und ggfs. Weiterentwicklung von Sekundärströmungsansätzen in 2D-Modellen bei gleichzeitiger Überprüfung bestehender bzw. Implementierung neuer Schubspannungsansätze in den verwendeten 2D- und 3D-Verfahren den Schwerpunkt der Untersuchungen. Die Frage nach dem Potential der dreidimensionalen Strömungsmodellierung, die morphodynamischen Prozesse im mesoskaligen Bereich besser als 2D-tiefengemittelte Modelle abbilden zu können, sollte ebenfalls beantwortet werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Um den durch Bau-, Regelungs-, Instandhaltungs- und Geschiebemanagementmaßnahmen an Bundeswasserstraßen induzierten „morphodynamischen Nachlauf“ möglichst gut abschätzen und detaillierter planen zu können, bietet sich in der BAW u.a. der Einsatz numerischer Feststofftransportmodelle an. Solche Modelle liefern Prognosen zur Entwicklung der Sohle vor und nach einem baulichen Eingriff und können sowohl zum Nachweis der großräumigen und langfristigen Wirkung der Maßnahmen wie auch zur Optimierung der Vorgehensweisen und Abläufe im Nahbereich des Eingriffs eingesetzt werden. Da der Bewegungsbeginn bekanntlich schon in Laboruntersuchungen eine sehr große Streubreite aufweist, ist seine modelltechnische Abbildung mit einer entsprechenden Unschärfe gekoppelt, die sich wiederum maßgeblich auf die quantitative Erfassung von Sedimenttransport und Bettbildung auswirkt.

### 1.3 Untersuchungsziel

Als Ziel der Untersuchungen sollen dreidimensionale Strömungseffekte und die damit verknüpften Transportphänomene in den numerischen 2D- und 3D-Modellen, die auf der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung beruhen, adäquat erfasst werden. Ferner sollen die bisher in den numerischen Verfahren verwendeten Ansätze für den Bewegungsbeginn anhand von aktuellen Methoden, die ggfs. auf deterministischen, stochastischen oder gemischten Ansätzen beruhen, verfeinert werden. Durch deren Implementierung in die numerischen Modelle der BAW sollen die Planung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen und die Vorhersage von morphodynamischen Entwicklungstendenzen in Bundeswasserstraßen künftig zuverlässiger und genauer werden (BAW, 2010).

### 2 Untersuchungsmethoden

Da die Untersuchungen primär der Weiterentwicklung der numerischen Methoden der BAW im Bereich des Flussbaus dienen sollen, steht das TELEMAC-SISYPHE-Programmsystem ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)) im Vordergrund. Zur Validierung werden unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Feststofftransportmodellierung betrachtet. Hierbei werden zwei- und dreidimensionale Berechnungen für Laborgerinne sowie natürliche Gewässerabschnitte durchgeführt, um die für die Geschiebetransportmodellierung maßgebenden Prozesse an den Bundeswasserstraßen zu identifizieren. Ziel der Untersuchungen ist es, belastbare Aussagen aus der numerischen Modellierung zu erhalten und daraus eine Bewertung der numerischen 2D- und 3D-Verfahren bzgl. der hydraulischen und morphologischen Ergebnisse ableiten zu können.

### 3 Ergebnisse

Die wesentlichen Erkenntnisse aus den zur Codeerweiterung und Modellanwendung erforderlichen Untersuchungen und Validierungen sind in mehreren Berichten des IWG „zur Weiterentwicklung der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung“ ausführlich dargestellt. Der vorliegende FuE-Abschlussbericht (BAW, 2015) konzentriert sich daher auf die wesentlichen Informationen zur Struktur, zum Ablauf und zur Dokumentation des Forschungsvorhabens.

Hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen der bis dato eingesetzten Methoden kann ein Resümee auf die folgenden Kernaussagen zusammengefasst werden:

- Die mittels 3D-Modell berechnete Sekundärströmung, die Erfassung von Haupt- sowie Außenwirbeln stimmt gut mit den Natur- und Labordaten überein. Die 3D-Modellierung mittels hydrostatischen (quasi-3D) bzw. nicht-hydrostatischen (3D) Druckansatzes liefert bei großen Breiten-/Tiefenverhältnissen lediglich geringe Unterschiede bzgl. der morphologischen Ergebnisse.
- Die Berücksichtigung des Einflusses der Sekundärströmung auf den Geschiebetransport im 2D-tiefengemittelten Modell zeigt generell gute Übereinstimmungen mit dem jeweiligen 3D-Modell. Die größten Differenzen treten im Bereich von Krümmungsübergängen auf. Durch eine räumliche Anpassung der Parameter des Sekundärströmungsansatzes an die jeweiligen Randbedingungen könnte die Prognosefähigkeit der 2D-Modelle bezüglich Bedarf und erträglichem Mehraufwand gesteigert werden.
- Die Verwendung des Sekundärströmungsansatzes mit Entwicklungslänge führt im 2D-FTM des Labormäanders zu einer lokalen Verbesserung der morphologischen Ergebnisse. Im 2D-FTM des Niederrheinmäanders ist jedoch keine relevante Verbesserung der Sohlentwicklung zu verzeichnen.
- Die neu implementierte Geschiebetransportformel nach Wu und der Ansatz nach Meyer-Peter und Müller liefern in den getesteten Laboranwendungen vergleichbare morphologische Ergebnisse.
- Die verwendeten Ansätze zur Berücksichtigung des gravitativen Transports führen zu einer signifikanten Beeinflussung der morphologischen Ergebnisse bis hin zu unrealistischen Sohlentwicklungen. Die richtige Parameterwahl bzw. -justierung ist deswegen bei 2D- und 3D-Modellen von großer Bedeutung.

Die Ergebnisse lassen weitgehend darauf schließen, dass Quasi-3D-Modelle und vor allem 2D-tiefengemittelte Modelle für die an Bundeswasserstraßen typischen Breiten-/Tiefenverhältnisse den Einfluss der Sekundärströmung auf den Geschiebetransport ausreichend berücksichtigen. Unzulänglichkeiten in der 2D-Modellierung an Krümmungsübergängen können unter gewissem Mehraufwand behoben werden.

Generell musste festgestellt werden, dass die fraktionierte Transportmodellierung einen sehr hohen Modellierungsaufwand erzeugt. Das fraktionierte Transportmodell mit seiner Vielzahl von Freiheitsgraden stellt für den Anwender vor allem bei instationären Abflüssen ein sehr komplexes Modellierungswerkzeug dar, dessen Verhalten schwer einzuschätzen ist.

Da sich die o.g. Untersuchungen weitgehend auf deterministische Methoden beschränkten, sollten in einem künftigen FuE-Projekt primär stochastische Methoden betrachtet und aktuelle Ansätze wie z.B. der von Tsai und Lai (2014) bis hin zu einem Ansatz mit künstlichen neuronalen Netzen von Bui et al. (2015) hinsichtlich ihrer Eignung für Problemstellungen an Bundeswasserstraßen getestet werden. Mit dem potentiellen Vorteil eines gegenüber fraktionierter FTM deutlich reduzierten Modellierungsaufwands können diese Methoden eine effiziente Alternative zur Lösung praktischer Problemstellungen darstellen.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2015.

#### **5 Literatur**

- BAW (2010): Fachkonzept der Projektgruppe Mehrdimensionale Feststofftransportmodellierung, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Version 1.0.
- BAW (2015): Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morpho-dynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen. Abschlussbericht zum FuE-Projekt A395301700030, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat W5, November 2015.
- Bui, M.D., Kaveh, K., Rutschmann, P. (2015): Integrating artificial networks into hydromorphological model for fluvial channels. E-Proc. 36th IAHR World Congress 2015, Den Haag.
- Tsai, C.W., Lai, K.-C. (2014): Three-State Continuous-Time Markov Chain Model for Mixed-Size Sediment Particle Transport. ASCE Journal Hydraulic Eng., publ. online 2014-06-23.

#### **6 Veröffentlichungen**

- BAW (2015): Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morpho-dynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen. Abschlussbericht zum FuE-Projekt A395301700030, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat W5, November 2015.
- IWG (2015a): 4. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der TELEMAT-SISYPHE Programmumgebung, Endbericht. KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Mai 2015.
- IWG (2015b): Bericht Validierungsfall Niederrheinmäander. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, November 2015.
- Riesterer, J., Brudy-Zippelius, T., Wenka, T., Nestmann, F. (2016): Multidimensional Bed Load Transport Modelling of a Secondary Flow influenced Curved Channel. Zur Veröffentlichung eingereicht bei: IAHR, Journal of Applied Water Engineering and Research.
- Wenka, T., Schmidt, A., Brudy-Zippelius, T. (2015): Consideration of three-dimensional flow and transport phenomena in morphological models of inland waterways. E-Proc. 36<sup>th</sup> IAHR World Congress 2015, Den Haag.

## **Wartezeiten vor Engstellen**

**Netzplan-Nr.:** A39530410036

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. B. Söhngen, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)

**E-Mail:** bernhard.soehngen@baw.de

## **1 Problemstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Wegen der anhaltenden Tendenz zum Bau größerer Fahrzeuge und der veränderten Zulassungsbedingungen für Fahrzeuge auf Binnenwasserstraßen, die generell größere Verbandszusammenstellungen erlauben, wird es vermehrt Wasserstraßenabschnitte geben, in denen nur bestimmte Fahrzeuge begegnen oder überholen können bzw. im Grenzfall sogar nur im Richtungsverkehr befahrbar sind wie am Mittelrhein im Bereich Jungferngrund-Loreley. Dies gilt vor allem für Bereiche, in denen es ggf. künftig zu Einschränkungen der Fahrrinnenbreiten zugunsten größerer Fahrrinntiefen kommen könnte oder in denen es bereits Abschnitte gibt, in denen die Soltiefe der Fahrrinne nur auf eingeschränkter Breite vorliegt wie an der Donau im Abschnitt Straubing-Vilshofen oder am Rhein zwischen Koblenz und Köln. Ein besonderes Problem sind hierbei extreme Niedrigwasserereignisse, die im Zeichen der Klimawandels voraussichtlich vermehrt auftreten werden und bei denen eine geringere verfügbare Fahrwasserbreite mit einem vermehrten Verkehrsaufkommen zusammenfällt, wie es jüngste Niedrigwasserereignisse auf dem Rhein gezeigt haben. Zur Erkennung und Bewertung von Engpässen und daraus folgenden Empfehlungen für Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen bzw. zur Neufestlegung der Fahrrinne, wie sie für den Rhein seitens des BMVBS und der beteiligten Außenstellen der GDWS am Rhein in einem Auftrag an die BAW zu untersuchen ist, sind deshalb, neben der Kenntnis des Verkehrsflächenbedarfs von Bemessungsschiffen im Vergleich zur vorhandenen Fahrwasserbreite, auch die verkehrlichen Randbedingungen zu beachten. Hierzu ist das Verkehrsgeschehen zu simulieren.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Wartezeiten vor Engstellen oder begrenzte Überholmöglichkeiten mindern den volkswirtschaftlichen Nutzen des Verkehrsträgers Binnenschiff. Dieser muss u. a. dem Aufwand zur Engstellenbeseitigung gegenübergestellt werden. Wenn dieser unverhältnismäßig hoch ist, können Engpässe, die Begegnungen oder Überholungen von Fahrzeugen ausschließen, hingenommen werden.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Die Untersuchungen zielen auf die Entwicklung, Verifikation und Anwendung eines Verkehrssimulationsmodells für Binnenschiffe in Gewässern, das mit möglichst wenigen Eingabedaten, z. B. hinsichtlich der Schiffsankünfte an Kontrollstellen, auskommt. Wegen eines Ende 2011 gestarteten Grundsatzauftrages der WSV zur Überprüfung von Fahrrinnenbreiten am freifließenden Rhein hat das Vorhaben eine besondere Aktualität und einen erweiterten Fokus erhalten. So soll nicht nur die Grenze möglicher verkehrlicher Situationen ausgelotet werden, sondern es sollen durch Einbeziehung des menschlichen Verhaltens der Schiffsführer auch Fahrsituationen einbezogen werden, die im Grunde technisch nicht zulässig oder möglich wären. Damit soll die Lücke zur Unfallanalyse geschlossen werden.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Die Simulation des Verkehrsgeschehens erfolgte bisher mit dem Verfahren BISS (Binnenschiffahrts-Simulator), das nach vorgegebenen fahrdynamischen Algorithmen der BAW von einer externen Firma im Auftrag der BAW entwickelt wurde. Die Verfahrensentwicklung ist algorithmisch abgeschlossen. Das Verfahren wurde erfolgreich auf Abschnitte der Mittelweser angewendet. Defizite zeigten sich bei der Implementierung in der BAW und vor allem bei der Handhabung des Programms von BAW-Mitarbeitern. Die Analyse der Programmarchitektur im Rahmen eines vorgesehenen Reengineering des Programms zeigte, dass diese den zukünftigen Anforderungen nicht genügt. Deshalb wurde eine

Neuentwicklung in Angriff genommen, wobei das Institut für Wirtschaft und Verkehr der TU Dresden als Entwickler gewonnen werden konnte. Dort werden seit vielen Jahren mikroskopische Verkehrssimulationsmodelle für den Straßenverkehr entwickelt und angewendet, bei denen das dynamische Verhalten jedes einzelnen Fahrzeugs durch entsprechende Bewegungsgleichungen modelliert wird (Treiber, M., Kersting, A. (2010)). Diese bilden zusätzlich auch das menschliche Verhalten der Fahrzeugführer ab. Alle Fahrzeugführer reagieren aufeinander nach festgelegten Regeln, die denen des Schiffsverkehrs sehr nahe kommen. Dabei wird von einem Verkehr auf mehreren, jedoch dynamisch angepassten Spuren mit Wechsel der Fahrspuren bei Begegnungen oder Überholungen ausgegangen. Der Verkehrsflächenbedarf, der die Spurbreite bestimmt, wird dabei für jedes Fahrzeug, jede Fahrzeugkombination und zu jedem Zeitpunkt errechnet und bestimmt die mögliche verkehrliche Situation. Die zugehörigen semiempirischen Algorithmen zu den Zusatzbreiten bei Kurvenfahrt, aus der Abdrift im Querströmungsfeld, der Instabilität des Schiffspfades oder aus der Fahrt in der Nähe von geböschten Ufern oder von Buhnen sowie aus der Interaktion zweier Schiffe bei Begegnungen oder Überholungen, wurden im Rahmen des KLIWAS TP 4.4 entwickelt und inzwischen implementiert. Die Gleichungen zur Längsbewegung eines Schiffes, die die mögliche Schiffsgeschwindigkeit bestimmen, wurden für die Entwicklung des Programmes PeTra2D hergeleitet und anhand von Modell- und Naturdaten kalibriert. Hierzu gehören der Propellerschub, der Schiffswiderstand sowie die kritische Schiffsgeschwindigkeit, wobei diese Formeln Querprofilinformationen mit zugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten benötigen, die alle 100 m bereitgestellt werden. Der Einfluss des „human factor“ auf die Längsbewegung wird derzeit über ein angepasstes „Intelligent Driver Modell“ erfasst.

### **3 Ergebnisse**

Das FuE-Projekt wurde 2015 ohne Abschlussbericht beendet. Die Projektergebnisse wurden in den unten stehenden Veröffentlichungen dokumentiert.

Die am Institut für „Ökonometrie und Statistik, insb. im Verkehrswesen“ der TU Dresden beauftragten Untersuchungen und Entwicklungen eines Verfahrens zur Mikrosimulation des Verkehrs werden im Rahmen des WSV-Projektes zur Ermittlung des Fahrrinnenbreitenbedarfs am Rhein fortgeführt.

### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Laufzeit des Vorhabens: 2001 bis 2015.

### **5 Literatur**

-/-

### **6 Veröffentlichungen**

- Fa. TraffGo (2007): Abschlussbericht BISS III. Simulation des Schiffsverkehrs auf der Mittelweser mit detaillierten Schleusenregeln. Fa. TraffGo, Duisburg. Juni 2007.
- Fischer, N., Treiber, M., Söhngen, B. (2014): Modeling and Simulating Traffic Flow on Inland Waterways. Proceedings of the XXXIIIth PIANC World Congress, San Francisco, 2014.
- Fischer, N. 2015: Microsimulation des Schiffsverkehrs am Beispiel des Rheins, BAW-Kolloquium, 26.&27.11.2015, Karlsruhe
- Treiber, M., Kersting, A. (2010): Verkehrsdynamik und –simulation. Springer-Verlag.



## Weiterentwicklung der Methoden zur Analyse von Simulationsergebnissen

**Netzplan-Nr.:** A39550370200

**Projektleiter:** Dr.-Ing. G. Lang, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** guenther.lang@baw.de

### 1 Problemdarstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Mathematische Verfahren wie *UNTRIM* und *UNTRIM<sup>2</sup>* (mit *SubGrid*) ermöglichen die numerische Simulation vieler für das Tidegebiet bedeutsamer physikalischer Prozesse [Casulli, V., 2008], [Casulli, V., Stelling, G. S., 2010]. Hierzu zählen u. a. die Ausbreitung der Tidewelle, der Wechsel von Ebbe- und Flutstrom, der Transport von Salz, Wärme oder Schwebstoffen im Wasserkörper, der sohlnahe Sedimenttransport, sowie der Austausch von Sedimenten zwischen Wasserkörper und Boden (Deposition und Erosion) zusammen mit der daraus resultierenden Veränderung der Morphologie.

In der Regel werden die Berechnungsergebnisse, beispielsweise Wasserspiegelauslenkung, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt, in äquidistanten Zeitabständen (z. B. alle 10 Minuten) in Dateien geschrieben. Diese *synoptischen* Datensätze können im Anschluss an die Simulation *visualisiert*, zu *Animationen* zusammengefasst oder weitergehend *analysiert* werden.

Wichtige Fragen zu den Konsequenzen anthropogener Eingriffe in das Tidegebiet, oder zu den Auswirkungen natürlicher Veränderungen (z. B. säkularer Meeresspiegelanstieg) auf das Systemverhalten, können in dem von hoher zeitlicher und räumlicher Variabilität geprägten Tidegewässern nicht, oder nur unzureichend durch ausschließliche Verwendung synoptischer Datensätze beantwortet werden. Hier bedarf es einer weiter gehenden Analyse der Simulationsergebnisse.

Derartige Analysemethoden werden seit Anfang der 1990er Jahre intensiv und erfolgreich in vielen Projekten eingesetzt. Sie sind unverzichtbarer Bestandteil praktisch aller für die WSV durchgeführten Arbeiten sowie verschiedener Forschungsprojekte. Allerdings bestehen folgende Beschränkungen:

- Es können nur Daten an den Knoten des Berechnungsgitters analysiert werden.
- Die Daten müssen in dem Dateiformat BDF (Binäres Daten Format) vorliegen, welches ausschließlich in der BAW benutzt wird.
- Eine Analyse von Daten mit *SubGrid* (HN-Verfahren *UNTRIM<sup>2</sup>*) ist nicht möglich.
- Die Softwarearchitektur der Analyseprogramme ist „in die Jahre gekommen“.
- Die Laufzeit der Analyseprogramme ist teilweise (zu) lang.
- Kenngrößen analog zu den in der Meteorologie benutzten *klimatologischen Statistiken* - also auf die Zeiteinheiten Tag, Monat, Quartal, Jahr, klimatologische Periode bezogene Größen – werden für „unsere“ Größen Wasserstand, Strömung usw. derzeit nicht berechnet.

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Die Berechnung von Kenngrößen aus den Ergebnissen mathematischer Verfahren ist integraler und daher unverzichtbarer Bestandteil praktisch aller für die WSV in Bezug auf Fragestellungen an den Seeschiffahrtsstraßen in der BAW durchgeführten Untersuchungen.

Bei den berechneten Kenngrößen handelt es sich in vielen Fällen um die in DIN 4049-3 Hydrologie definierten Größen. Daher sind die aus den Simulationsergebnissen abgeleiteten Kenngrößen allgemein bekannt, verständlich, und von unmittelbarem Nutzen für die Projektpartner in der WSV. Aber auch Dritte, beispielsweise externe Gutachter, die im Rahmen von Planfeststellungsverfahren für die WSV tätig sind, bauen ihre Gutachten zu einem guten Teil auf den von der BAW berechneten Kenngrößen auf.

In dem FuE-Projekt „UnTRIM SubGrid-Topografie“ (A39550370150) wurde das mathematische Verfahren UnTRIM<sup>2</sup> eingehend erprobt. Um UnTRIM<sup>2</sup> sinnvoll einsetzen zu können, müssen die Analysemethoden für die SubGrid-Technologie (SGT) erweitert werden.

### 1.3 Untersuchungsziel

Überarbeitung vorhandener und Neuentwicklung fehlender Methoden zur Analyse von Simulationsergebnissen:

- Verbesserung der Softwarearchitektur – konzeptioneller Entwurf (**WP1**).
- Verwenden eines international gängigen Datei- und Metadatenstandards (**WP2**).
- Re-Integration der Analyse für knotenorientierte Daten (**WP3**).
- Erweiterung der Analyse für nicht knotenorientierte Daten: Kanten, Polygone, Zellen und Zellen-seitenflächen (**WP4**) .
- Erweiterung der Analyse für Daten mit SubGrid (HN-Verfahren UNTRIM<sup>2</sup>) (**WP5**) .
- Reduzieren der Laufzeit (**WP6**) .
- Integration neuer Analysemethoden (**WP7**) .

## 2 Untersuchungsmethoden

Um die unter 1.1 aufgezählten Defizite beseitigen und die neuen Ziele erreichen zu können, muss zunächst ein konzeptioneller Entwurf für die neuen Datenanalyse-Programme erstellt werden. Teilweise müssen die Definitionen der Analysegrößen überarbeitet werden, um die aus der SubGrid Technologie resultierenden Anforderungen berücksichtigen zu können

## 3 Ergebnisse

### Arbeitspaket WP1

Die Software wird in Fortran95 entwickelt. Zur besseren Strukturierung werden Module eingesetzt. Module, die von mehreren Anwendungen genutzt werden können, werden in Paketen zusammengefasst. Die Berechnung der Kenngrößen wird über externe Konfigurationsdateien gesteuert. Neue Kenngrößen können damit häufig alleine durch Erweiterung der Konfigurationsdatei hinzugefügt werden.

### Arbeitspaket WP2

In Zusammenarbeit mit *Deltares* (Delft) wurde das NetCDF Dateiformat zusammen mit dem CF Metadatenstandard für die Speicherung der Daten und Metadaten ausgewählt. Hierbei wurde CF für Daten auf unstrukturierten Gitternetzen erweitert. NetCDF und CF sind international weit verbreitet. Die wesentlichen Aspekte sind ausführlich in dem BAWiki dokumentiert (siehe „Veröffentlichungen“).

### Arbeitspakete WP3, WP4 und WP5

Das in Entwicklung befindliche Programm NCANALYSE kann NetCDF Dateien mit knoten-, kanten- sowie polygonorientierten Daten lesen und analysieren. Bislang wurden die Tide- sowie Langzeit-Kennwerte des Wasserstands, der Strömungsgeschwindigkeit und des Salzgehalts (re-) implementiert. Daten mit SubGrid werden unterstützt.

Bild 1 zeigt eine Darstellung der an Originalposition „edge“ berechneten Flutstromdauer zusammen mit den für Position „face“ interpolierten Werten.

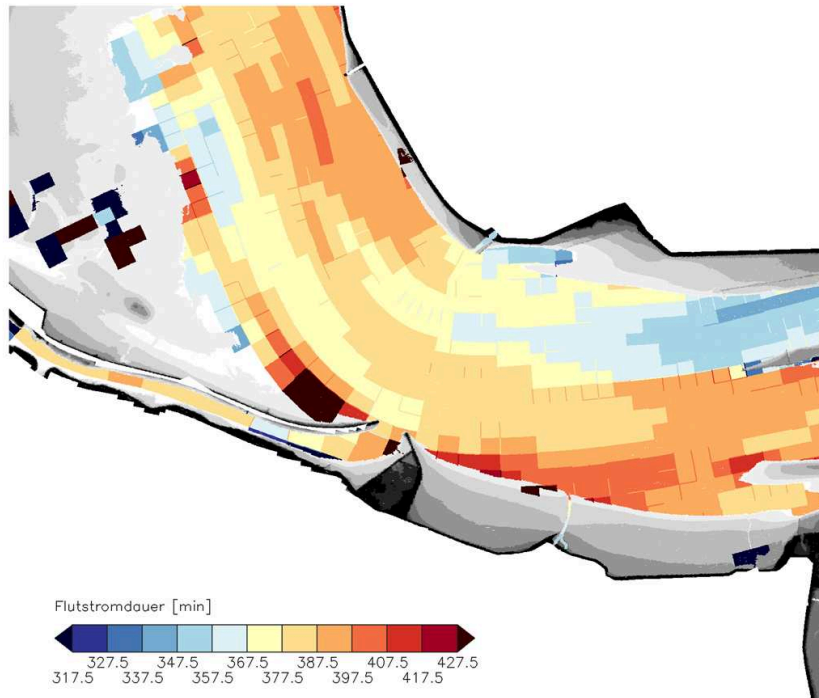
### Arbeitspaket WP6

Das Analyseprogramm NCANALYSE wurde mit OpenMP und MPI parallelisiert.

### Arbeitspaket WP7

Neue Kenngrößen für den Transport von Wasser, Salz, Wärme, Schwebstoff werden berechnet. Mit dem Programm NCAGGREGATE können Daten für Kontrollvolumina aggregiert werden. Die MATLAB *Stand-Alone* Anwendungen INSPECT\_CONTROL\_VOLUMES und DISPLAY\_CONTROL\_VOLUMES ermöglichen eine weitergehende Auswertung der aggregierten Daten.

Alle im Rahmen des Projekts entwickelten Programme stehen in PROGHOME (Software-Sammlung der BAW DH) allgemein zur Verfügung.



**Bild 1:** Flutstromdauer an (originaler) Berechnungsposition „edge“ und interpoliert für Position „face“. Die Unterschiede zwischen den für die Originalposition berechneten Werten sowie den interpolierten Daten sind stellenweise klar zu erkennen. Dargestellt ist ein Ausschnitt aus dem Ems-Ästuar für den Bereich Knock. Visualisierungsprogramm NCPlot. .

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das FuE-Projekt wurde in 2015 abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

#### 5 Literatur

- Casulli, V., Stelling, G. S. (2010): Semi-implicit sub grid modelling of three-dimensional free-surface flows. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Band 67, Heft 4, 441 – 449, Okt. 2011.
- Casulli, V. (2008): A high resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Band 60, Heft 4, 391 - 408.
- Sehili, A., Lang, G. and Lippert, C. (2014): High-resolution subgrid models: background, grid generation and implementation, Ocean Dynamics, Band 64, Heft 4, 519 – 535.

#### 6 Veröffentlichungen (BAWiki und Internet)

- 1.) [http://www.baw.de/methoden/index.php5/Analyse\\_der\\_Berechnungsergebnisse](http://www.baw.de/methoden/index.php5/Analyse_der_Berechnungsergebnisse).
- 2.) <http://www.baw.de/methoden/index.php5/NetCDF>.
- 3.) <http://www.baw.de/methoden/index.php5/NCAGGREGATE>.
- 4.) <http://www.baw.de/methoden/index.php5/NCANALYSE>.
- 5.) <http://www.baw.de/methoden/index.php5/NCPlot>.
- 6.) [http://www.baw.de/methoden/index.php5/INSPECT\\_CONTROL\\_VOLUMES](http://www.baw.de/methoden/index.php5/INSPECT_CONTROL_VOLUMES).
- 7.) [http://www.baw.de/methoden/index.php5/DISPLAY\\_CONTROL\\_VOLUMES](http://www.baw.de/methoden/index.php5/DISPLAY_CONTROL_VOLUMES).

## **Verbesserung von Methoden und Verfahren der BAW zur Entwicklung und belastbaren Beurteilung von Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems**

**Netzplan-Nr.:** A39550370211

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. N. Winkel, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme II (K3)

**Bearbeiterin:** Dipl.-Ing. M. Naulin, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** norbert.winkel@baw.de, marie.naulin@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Das Emsästuar ist ein ausgeprägtes flutstromdominantes System. Dies führt durch den stromaufgerichteten Schwebstofftransport zu einer erheblichen Verschlickung der Unterems. Um Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems zu untersuchen und belastbar zu beurteilen, sollen Methoden und Verfahren der BAW im Rahmen dieses FuE-Projekts weiterentwickelt und verbessert werden. Basierend auf den Ergebnissen des Aktionsprogramms Ems (BAW, 2010) sollen die dafür notwendigen Untersuchungen mit den hydrodynamisch morphologisch numerischen Modellen der BAW durchgeführt werden. Das Projekt umfasst folgende Forschungsschwerpunkte:

- Es sollen wasserbauliche Maßnahmen zur Reduzierung des stromaufwärtsgerichteten Schwebstofftransportes sowie der Verschlickung der Unterems entwickelt und objektiv eingeschätzt werden. Hierfür sind verschiedene mögliche Lösungsvarianten mit dem HN-Modell UnTRIM, welches mit dem numerischen Sedimenttransportmodell SediMorph gekoppelt wird, zu untersuchen und soweit möglich in ihrer Wirksamkeit zu optimieren.
- Die entwickelten wasserbaulichen Maßnahmen umfassen zudem hydraulische Querbauwerke deren Wirkung im Nahbereich durch das UnTRIM-Modell unter bestimmten Bedingungen nicht ausreichend physikalisch (und numerisch) genau berechnet werden kann. Hierfür sollen ggf. Modelle, die die lokale Wirkung von Bauwerken auf die Hydrodynamik adäquat berücksichtigen können, zur Absicherung der UnTRIM-Ergebnisse herangezogen werden.
- Die numerischen Modelle UnTRIM und SediMorph unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung und Optimierung. Neue oder überarbeitete Modellansätze, wie z.B. zur Modellierung der Turbulenz oder der Sinkgeschwindigkeit (konzentrations- und turbulenzabhängig), sowie weitere Modellverfahren, wie z.B. Delft3D, sollen überprüft werden. Auch die Wechselwirkung zwischen Wasserkörper, Flüssigschlick und (fester) Sohle ist ein entscheidender Prozess für die Hydro-, Schwebstoff-, und Morphodynamik der Unterems. Mit dem im KFKI-Forschungsvorhaben entwickelten Flüssigschlick-Modell MudSim (Wehr, 2012) sollen hierfür weitere Analysen sowie eine Integration der Software in die Programmumgebung der BAW erfolgen.
- Untersuchungen zu den Folgen eines Klimawandels wurden in den Forschungsprojekten KLIWAS (Seiffert et al., 2014) und KLIMZUG-Nord bei der BAW durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich sowohl durch einen Meeresspiegelanstieg als auch durch veränderte Abflussverhältnisse die Unterhaltungssituation der Schifffahrtsstraßen in den Ästuaren weiter verschlechtern wird. Deswegen sollten Lösungsvarianten hinsichtlich dieser möglichen Veränderungen geprüft werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Bedeutung des Sedimentmanagements ist in den letzten Jahren in allen Ästuaren der Deutschen Bucht gewachsen. Aufgrund ihrer relativ hohen Schwebstofffracht stellt die Ems hierbei eine besondere Herausforderung dar und bietet somit ein repräsentatives Ästuarsystem zur Erforschung der Sedimentdynamik. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in zukünftige Projekte einfließen und auch auf andere Ästuar übertragen werden, somit ergibt sich folgende Bedeutung für die WSV:

- Regelmäßig entstehen an der Ems hohe Kosten aufgrund von Baggerungen, die es zu reduzieren gilt. Die Wirkungsweise und der Wirkungsgrad verschiedener Lösungsvarianten sollen untersucht, eingeschätzt und beurteilt werden. Die Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für zukünftige Untersuchungen und Ziele im Rahmen des „Masterplans Ems 2050“.
- Die Weiterentwicklung und Verbesserung der in diesem Vorhaben eingesetzten Methoden und Verfahren werden auch in anderen WSV-Projekten zukünftig nutzbar sein.

- Die Qualitätssicherung der Erkenntnisse aus Simulationsdaten ist grundlegend für gutachterliche Aussagen der BAW. Dafür ist es notwendig, Defizite/Unzulänglichkeiten der einzelnen Untersuchungsmethoden mit zusätzlichen Methoden (hier ein Bauwerks-Modell) auszugleichen.
- Das erhöhte Vorkommen von Fluid Mud und hochkonzentrierten Schlicksuspensionen in der Ems ist weiter zu untersuchen, um Fragestellungen zur Entwicklung und Optimierung von Unterhaltungsstrategien, zur Wechselwirkung und Beeinflussung der Gewässergüte sowie der nautischen Sohle beantworten zu können.
- Die Auswirkungen eines Klimawandels auf die Unterhaltungssituation in der Unterems sollen analysiert und möglichst reduziert werden.

### 1.3 Untersuchungsziel

Es ergeben sich folgende Untersuchungs- bzw. Forschungsschwerpunkte:

- Entwicklung und Optimierung wasserbaulicher Maßnahmen zur Reduzierung des stromauf gerichteten Schwebstofftransports sowie der Reduzierung der Verschlickung der Unterems (**WP1**).
- Zur Absicherung der Modellergebnisse im Nahbereich der entwickelten wasserbaulichen Maßnahmen (z. B. Querbauwerk) sollen die Gültigkeit der Modelle überprüft und ggf. Bauwerks-Modelle eingesetzt werden (**WP2**).
- Die Wechselwirkung zwischen den Schwebstoffen im Wasserkörper und der Bildung hochkonzentrierter Schlicksuspensionen bis hin zu Fluid Mud ist in der Unterems ein nicht zu vernachlässigender physikalischer Prozess. Neu integrierte Modellansätze, beispielsweise zur Modellierung der Turbulenz oder der Sinkgeschwindigkeit (konzentrations- und turbulenzabhängig), um die Sediment- und Schwebstoffdynamik naturnäher zu prognostizieren, sollen angewandt werden. Langfristig wird die Entwicklung und Integration des Flüssigschlick-Modells MudSim in die vorhandene Simulationssoftware angestrebt (**WP3**).
- Prüfung der Wirkung der im Rahmen des FuE-Projekts entwickelten wasserbaulichen Maßnahmen sowohl bei Extremereignissen (Sturmflut, Oberwasserzufluss) als auch bei möglichen Folgen eines Klimawandels (z. B. Meeresspiegelanstieg) (**WP4**).

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen werden mit hydrodynamisch morphologisch numerischen Modellen (UnTRIM mit SediMorph und Delft3D) sowie teilweise mit dem Flüssigschlick-Modell (MudSim) durchgeführt.

## 3 Ergebnisse

Im Jahr 2015 wurden die Ergebnisse in einem Abschlussbericht (BAW, 2015) dokumentiert sowie auf einem BAWKolloquium (Naulin et al. 2015) präsentiert und diskutiert.

### Arbeitspakt WP1: Wasserbauliche Maßnahmen

Es wurde eine Übersicht möglicher wasserbaulicher Maßnahmen zur Schwebstofffrachtreduzierung erstellt (Bild 1). Zu diesen Maßnahmen zählen u. a. eine Verlängerung des Emsästuars, eine Sohlschwelle mit/ohne Wehrsteuerung sowie Tidepolder. Für die möglichen Lösungsvarianten erfolgte eine Simulation (UnTRIM und SediMorph) und Analyse. Die Wirkung zur Reduzierung des Schwebstofftransports in die Unterems wurde dokumentiert. Weiterhin wurde die technische Machbarkeit einer Simulation von beweglichen Elementen einer Sohlschwelle, d.h. eine Wehrlegung, erfolgreich geprüft und erste Szenarien für eine mögliche Wehrsteuerung analysiert.

### Arbeitspakt WP2: Modellierungen des Nahbereichs von Wasserquerbauwerken

Es wurde eine Road-Map erstellt, um die Eignung bzw. Nicht-Eignung des BAW-Modells zur Prognose der Hydrodynamik im Nahbereich von Querbauwerken wie der Sohlschwelle zu untersuchen und eine Abschätzung und Bewertung der Aussagefähigkeit der Simulationsergebnisse zu erzielen.

### Arbeitspakt WP3: Systemstudien, Modellentwicklung und -optimierung

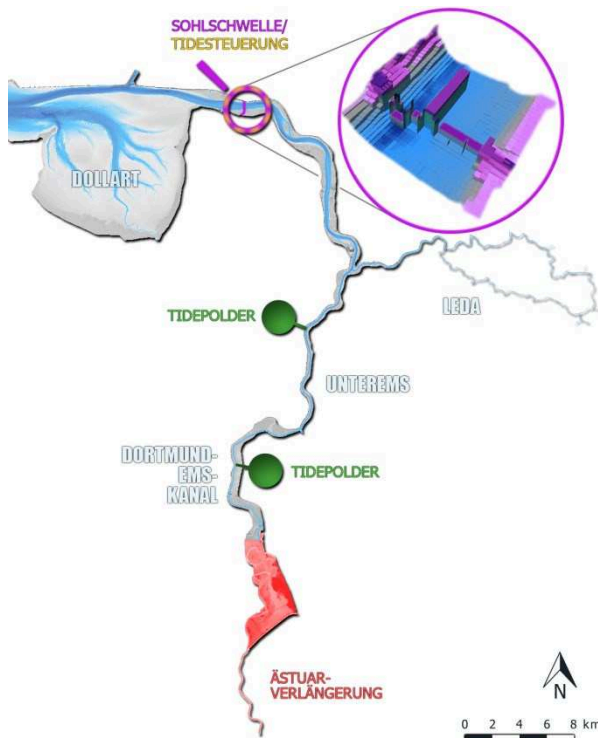
Ein Modellaufbau und eine erste Kalibrierung eines Modells des Emsästuars wurden mit Delft3D durchgeführt.

Für die Erstellung eines Flüssigschlick-Modells der Unterems erfolgten ein Modellaufbau und eine erste Kalibrierung mit MudSim. Weiterhin wurde mit der Integration von MudSim in die vorhandene

Simulationssoftware der BAW begonnen und die Ausgabe der Simulationsergebnisse im NetCDF CF Format ermöglicht.

#### Arbeitspaket WP4: Extremereignisse und Klimawandel

Es erfolgte eine Untersuchung möglicher Szenarien eines Klimawandels (Meeresspiegelanstieg und niedrige Abflussverhältnisse).



**Bild 1:** Mögliche wasserbauliche Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstoffeintrags in die Unterems.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Das FuE-Projekt wurde in 2015 abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2015.

#### **5 Literatur**

- BAW (2010): Aktionsprogramm des Bundes zur Reduzierung seines Unterhaltungsaufwandes und der Minimierung der Verschlickung der Unterems – Gutachten zur vertieften Wirkungsanalyse. Gutachten, BAW-Nr. A3955 03 10143, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. Unveröffentlicht.
- Wehr, D. (2012): An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics; Dissertation; Mitteilungen Institut für Wasserwesen, Heft 115, Universität der Bundeswehr München, 228 S.
- Seiffert, R., Hesser, F., Büscher, A., Fricke, B., Holzwarth, I., Rudolph, E., Sehili, A., Seiß, G., Winkel, N. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuar. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports - Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02

## 6 Veröffentlichungen

- BAW (2015): Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems. FuE-Abschlussbericht, BAW-Nr. A395 503 70211, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. Unveröffentlicht.
- Naulin, M.; Jürges, J.; Ritter, K. (2015): Aktuelle Situation an der Ems und mögliche Lösungsansätze: Masterplan Ems 2050, Tagungsband BAW-Kolloquium, Projekte und Entwicklungen für aktuelle Fragestellungen im Küstenwasserbau, 18.06.2015, Hamburg
- Jürges, J. (2013): Grundsatzuntersuchung zur Verlängerung des Emsästuars, Tagungsband BAW-Kolloquium, Projekte und Entwicklungen für aktuelle Fragestellungen im Küstenwasserbau, 19.09.2013, Hamburg
- Weilbeer, H.; Jürges, J., Wehr, D. (2013): Hydrodynamic and Sediment Transport Characteristics in the Ems-Dollart Estuary – An Insight into the Daily Work of BAW, Ems-Schelde-Workshop, 14.-15.02.2013, Delmenhorst
- Weilbeer, H.; Naulin, M.; Jürges, J. (2014): System Behavior of the Ems-Dollard-Estuary and Effectiveness of Selected Measures - Outcome of numerical model studies, Ems-Schelde-Workshop, 13.-14.02.2014, Antwerpen

**Schaffung von tidebeeinflussten Marschen an der Tideelbe zur Verbesserung des physikalisch-biologischen Systems****Netzplan-Nr.:** A39550370214**Projektleiter:** Dr. rer. nat. N. Winkel, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme II (K3)**E-Mail:** norbert.winkel@baw.de**Bearbeiterin:** Dr.-Ing. A. Büscher, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme II (K3)**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In diesem Projekt wird der Einfluss von neugeschaffenen tidebeeinflussten Marschen auf die hydrodynamischen Bedingungen in der Tideelbe sowie auf den Sedimenthaushalt untersucht. Dafür wird eine Landfläche, die gegenwärtig noch eingedeicht ist und deutlich unter NHN liegt, als Sedimentationsfläche genutzt. Diese könnten einen entscheidenden Beitrag leisten, die Auswirkungen bisheriger Ausbaumaßnahmen und eines möglichen zukünftigen Klimawandels ausgleichen zu können.

Im Projekt soll mithilfe eines geeigneten Bearbeitungskonzeptes geprüft werden, ob die Fläche so angeschlossen werden kann, dass die Tidedynamik und der Sedimenthaushalt positiv beeinflusst werden können. Zusätzliche Fragen ergeben sich im Zusammenhang mit der Wechselwirkung Physik – Biologie (z.B. Einfluss der Vegetation auf die Sedimentation), der Entwicklung der Brackwasser- und Trübungszone sowie der Schadstoffbelastung. Außerdem wird untersucht, ob diese Fläche auch als Vorfluter dienen könnte, um den NOK und den Binnenfluss Stör bei Extremereignissen bezogen auf die Entwässerung zu entlasten. Eine weitere wichtige Fragestellung besteht darin, ob und in welchem Maße die angeschlossene Fläche zu einer verbesserten Wechselwirkung zwischen dem Oberflächen- und dem Grundwasser führen kann (Beurteilung durch K1).

Für die Tideelbe ist bislang noch keine derartige Maßnahme untersucht worden. Den aktuellen Stand der Forschung geben die Untersuchungen wieder, die im Rahmen der Untersuchungen des Tideelbe-konzeptes (BAW 2012, HPA 2013) durchgeführt werden. Hier werden jedoch speziell Retentionsräume und Sedimentationsflächen im Bereich der Trübungszone untersucht.

**1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Zunahme der Feinmaterialmengen, die Schadstoffbelastung der Sedimente und die sommerlichen Sauerstoffdefizite prägen die bestehenden ökologischen Defizite in der Tideelbe. Die Zunahme der zu baggernden Feinmaterialmengen ist zum einen durch verstärkten Eintrag und Stromauftransport von marinem Feinmaterial sowie eine verstärkte Mobilität von Sedimenten (höhere Strömungsgeschwindigkeiten) und zum anderen durch eine Zunahme von Baggerkreisläufen bedingt. Für die WSV könnte die Schaffung von tidebeeinflussten Marschen eine Reduzierung der Unterhaltungsaufwendungen und eine Verbesserung des ökologischen Zustands der Tideelbe bedeuten.

**1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist der Aufbau eines Bearbeitungskonzeptes sowie die Ermittlung des Potenzials und der Realisierbarkeit derartiger Maßnahmen an der Tideelbe (Vorlauftforschung).

**2 Untersuchungsmethoden**

In Absprache mit der Universität Hamburg (Fremdleistungsempfänger) ist ein Konzept entwickelt worden zur Abschätzung des langfristigen Sedimentationsgeschehens und der Vegetationsentwicklung auf der Marsch über 100 Jahre unter Berücksichtigung eines Meeresspiegelanstiegs. Grundlage bildet die Anwendung des HN-Modells der Tideelbe durch die BAW und eines multiplen Regressionsmodells durch die Universität Hamburg. Es werden 4 Zeitscheiben à 25 Jahre sowie der Ist-Zustand 2010 mit angeschlossenem Flutraum betrachtet. Es wird pro Zeitscheibe näherungsweise ein Meeresspiegelanstieg von 25 cm angenommen (entspr. 100 cm in 100 Jahren). Des Weiteren wird mithilfe von HN-Simulationen und Tidekennwertanalysen der Einfluss des angeschlossenen Flutraums auf die



Tidedynamik und den Salz- und Schwebstofftransport in der Tideelbe untersucht. Weitere Details s. Kapitel 3.

### **3 Ergebnisse**

Im Berichtsjahr sind Untersuchungen zum Einfluss des Flutraums auf die Tidedynamik und den Salz- und Sedimenttransport bei konstantem Oberwasserzufluss in der Tideelbe durchgeführt worden. Außerdem ist eine Einschätzung des Sedimentationsverhaltens in Vegetationsgebieten auf der Grundlage von Modellsimulationen erfolgt. Alle Projektergebnisse sind in dem Abschlussbericht zusammengefasst worden.

### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Das Projekt ist mit der Abgabe des Abschlussberichtes abgeschlossen worden

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2015.

### **5 Literatur**

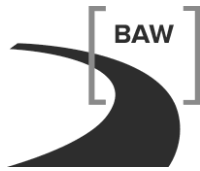
BAW (2012): Untersuchung des Strombaus und des Sedimentmanagements im Rahmen des "Tideelbekonzeptes". Bericht zur Wirkung der Maßnahmen im Bereich Spadenland. BAW-Nr. A3955 03 10172-4, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. Unveröffentlicht.

BfG (2013): Sedimentmanagement Tideelbe - Strategien und Potenziale - Systemstudie II. Ökologische Auswirkungen der Unterbringung von Feinmaterial. Band 1, Endbericht. Im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamtes Hamburg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BfG-1763.

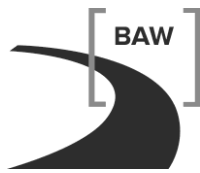
HPA (2013): Towards Integrated Estuarine Management. Tidal River Development. Manfred Meine, Hamburg Port Authority, Neuer Wandrahm 4, 20457 Hamburg. März 2013

### **6 Veröffentlichungen**

Geiger, C. (2014): Simulation und Analyse einer tidebeeinflussten Sedimentationszone im Deichhinterland und ihre Wirkung auf die Trübungszone im Elbästuar - Sensitivitätsstudie unter heutigen und möglichen zukünftigen Bedingungen. Masterarbeit, Studiengang Bauingenieurwesen, Technische Universität Hamburg-Harburg.



## **I. Laufende FuE-Vorhaben in 2015**



## **Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke (SiBeWa)**

**Netzplan-Nr.:** A39510070001

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. C. Kunz, Abteilung Bautechnik

**E-Mail:** claus.kunz@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die derzeit in Deutschland gültigen Bemessungsnormen gelten für Neubauten. Die Normen basieren auf einem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept, bei dem die Streuungen von Einwirkungen (z. B. Lasten) und Widerständen (z. B. Material-Festigkeitswerte) jeweils über charakteristische Werte und dazugehörige Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden. Mit Hilfe der daraus resultierenden Bemessungswerte wird innerhalb von Grenzzustandsgleichungen  $E_d < R_d$  das gewünschte Sicherheitsniveau (z. B. nach DIN EN 1990) sichergestellt. Bestehende Wasserbauwerke genügen vielfach nicht mehr den aktuellen Normen, die Fortschreibungen und Erkenntniszuwächse sowie auch neue Zuverlässigkeitskonzepte enthalten. Bei bestehenden Bauwerken können gesellschaftlich adäquate Zuverlässigkeitsziele und Erkenntnisse aus qualifizierten Bestandsaufnahmen (z. B. Geometrie, Kenntnisse über das statische System, Messungen von Einwirkungen, Erkundung von Materialeigenschaften, ...) genutzt werden, um die im Normkonzept enthaltenen Unsicherheiten zu reduzieren.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die bestehenden, im Mittel rund 70 Jahre alten Wasserbauwerke der WSV (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung) lassen sich mit Regelwerken für den Neubau schwer nachweisen, obwohl manche Bauwerke keine signifikanten Auffälligkeiten zeigen. Stilllegungen einerseits und generelle Grundinstandsetzungen andererseits strapazieren unverhältnismäßig Sachmittel- und Personalressourcen der WSV und behindern den Wasserstraßenverkehr. Ein unverhältnismäßiges Versagen von Wasserbauwerken muss dennoch ausgeschlossen sein.

Eine Nachrechnungs-Unterlage nach dem aktuellen Sicherheitskonzept, das die Erkenntnisse aus dem Betrieb und Bestand des Bauwerks (Informationen über die tatsächliche Nutzung, vorhandene Bauwerkseigenschaften, ...) angemessen berücksichtigt, soll das baurechtliche und nachweisrechnerische Defizit beseitigen, eine, ggf. auch quantitative Auskunft über die Sicherheit der Anlagen geben und zu einer Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen führen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Vorhabens ist für bestehende Wasserbauwerke die Ermittlung eines angemessenen Sicherheitsniveaus sowie die Bestimmung von modifizierten Teilsicherheitsbeiwerten, ggf. in Abhängigkeit von Randbedingungen, so dass die in Normen verankerten übliche Nachweisformate genutzt werden können. Damit soll eine praxisgerechte, sichere und wirtschaftliche Nachweisführung von bestehenden Wasserbauwerken bei Anwendung des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes ermöglicht werden und eine a.a.R.d.T. für bestehende Wasserbauwerke erstellt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die Untersuchung beinhaltet nach einem Literaturstudium über einschlägige Bearbeitungen die Durchführung von probabilistischen Analysen von Einwirkungen (Lasten) und Widerständen (Baustoffe), die im (Verkehrs-)Wasserbau von Bedeutung sind, mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie. Weitere Methoden sind Zuverlässigkeitsberechnungen nach FORM/SORM (vereinfachte Verfahren) sowie probabilistische Berechnungen, jeweils mit einschlägiger Fachsoftware. Zur Durchführung der Zuverlässigkeitsanalysen sind Grenzzustandsfunktionen für die maßgebenden Versagensarten bei (Verkehrs-)Wasserbauwerken aufzustellen und innerhalb von Parameterstudien zu analysieren.

### 3 Ergebnisse

Aus Überlegungen wurde das Zuverlässigkeitsniveau für neue Wasserbauwerke zu  $\beta = 3,8$  über die geplante Nutzungsdauer  $T_N = 100$  Jahre identifiziert. Aus dem Sicherheitskonzept nach DIN EN 1990 lässt sich für bestehende Bauwerke ein restnutzungsdauer-orientiertes Konzept ableiten, das nach schadensfreien Jahren zu modifizierten Zuverlässigkeiten für die Restnutzungsdauern führt, vgl. Bild 1. Untersuchungen zu Modellunsicherheiten, Variationskoeffizienten und Umrechnungsbeiwerten wurden angestellt. Zum Nachweis bestehender Wasserbauwerke ist ein angepasstes Zuverlässigkeitskonzept in Arbeit, um die Besonderheiten bestehender Tragwerke innerhalb der Nachweisgleichungen berücksichtigen zu können. Auf Basis der Beziehungen in DIN EN 1990 wurden modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für einige Einwirkungen und Widerstände erarbeitet, die in Bild 2 a) und b) abgebildet sind. Als Restnutzungsdauer gilt dabei  $T_{RN} = 30$  Jahre.

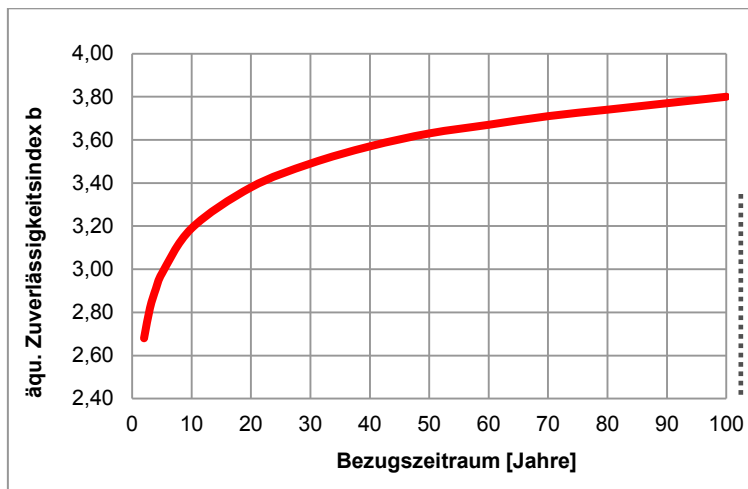


Bild 1: äquivalenter Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  über den Bezugszeitraum

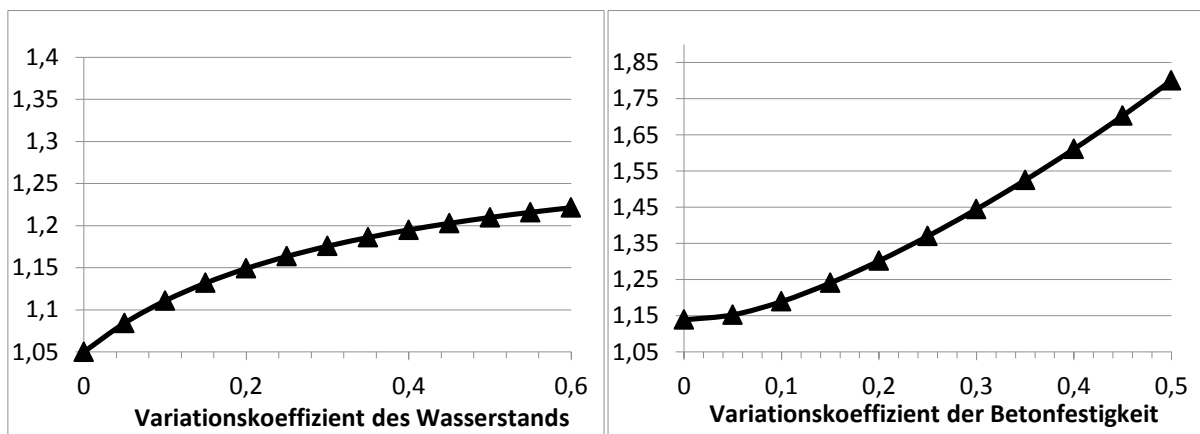


Bild 2: Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für a) die Einwirkung Wasserdruckkraft  $\gamma_Q = f(V_i)$  und b) für die Betonfestigkeit  $\gamma_M = f(V_i)$ , jeweils für eine Restnutzungsdauer  $T_{RN} = 30$  a.

In einem ersten Teilbericht „Sicherheitstheoretische Studie“, BAW (2014), sind Grundlagen, Literaturübersichten, einige Konzept-Ideen für die Anpassung des Zuverlässigkeitsniveaus, probabilistische Parameterstudien an einer exemplarisch unbewehrten Gewichtsstützmauer, angepasste Teilsicherheitsbeiwerte für einige relevante Einwirkungen und Widerstände dargestellt. Ergebnisse flossen in die Bearbeitung eines BAW-Merkblatt-Entwurfs „Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke (TbW)“, BAW (2015) ein. In Vergleichsberechnungen an Wasserbauwerken wurden die modifizierten Teilsicherheitsbeiwerte bereits angesetzt und ließen dadurch bestehende Wasserbauwerke als rechnerisch standssicher bewerten. Ergänzungen und Verallgemeinerungen der FuE-Bearbeitung sowie Praxis-

Bezüge sind noch anzuschließen. In 2015 konnte eine befristete Forschungsstelle noch nicht besetzt werden, so dass vom Bearbeitungsfortschritt Verzögerungen eingetreten sind.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016:

- Weitere Analysen zu den relevanten Einwirkungen Erddruck und Eigenlasten, Überlegungen zu einem gesellschaftlich adäquaten Zuverlässigkeitsniveau,
- Ableitung/Kalibrierung von (modifizierten) Teilsicherheitsbeiwerten nach der Zuverlässigkeitsmethode I. Ordnung (FORM/SORM),
- Vergleichsrechnungen für ausgewählte Fälle mit der (voll-)probabilistischen Methode,
- Zuverlässigkeitstheoretische Bewertung von nach früheren Normen erstellten (Verkehrs)Wasserbauwerken,
- Probabilistische Betrachtung bestehender Wasserbauwerke aus Stahlbeton,

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2016.

#### **5 Literatur**

BAW (2015). BAW-Merkblatt „Tragfähigkeit bestehender massiver Wasserbauwerke (TbW)“ – Entwurf April 2015, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

#### **6 Veröffentlichungen**

- Kunz, C.; Stauder, F. (2013): Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke. In: Bautechnik-Tag 2013, Tagungsband, Hamburg, 11. bis 12.04.2013. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein.
- BAW (2014): FuE-Bericht: „Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke – Teil 1: Sicherheitstheoretische Studie“, BAW-Nr. A39510070001-01, Dezember 2014.
- Kunz, C.: (2015a): Reliability of existing structures. In: 36<sup>th</sup> IAHR World Congress, 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands (e-proceedings).
- Kunz, C.: (2015b): „Ein Konzept für Teilsicherheitsbeiwerte für bestehende Wasserbauwerke“. In: Bautechnik 92 (2015), Heft 8. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2015.

## **Entwicklung eines Erhaltungsmanagementsystems für die WSV (EMS-WSV)**

**Netzplan-Nr.:** A39510070501 (alt: A39510110139)

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Bödefeld, Abteilung Bautechnik,  
Projektgruppe Erhaltungsmanagement (B5)

**E-Mail:** joerg.boedefeld@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Kern eines Erhaltungsmanagementsystems ist die Prognose des zukünftigen Zustandes eines Bauwerksbestandes unter Berücksichtigung von Instandhaltungsmaßnahmen. Ziel ist es, den Einsatz der Maßnahmen so zu steuern, dass die Finanzmittel optimal genutzt werden.

Während für Brückenbestände international Systeme existieren, gibt es für Verkehrswasserbauwerke kaum komplette Verfahren, PIANC n° 129 (2013). Nach Überprüfung und Anpassung können aber unterschiedliche Elemente der Management-Systeme übernommen werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Altersstruktur der Verkehrswasserbauwerke in der WSV wird immer ungünstiger. Bei Schleusen sind ca. 30 % der Bauwerke schon älter als 100 Jahre, haben also ihre geplante Lebensdauer überschritten. Demgegenüber stehen begrenzte Haushaltsmittel. Um auch künftig eine ausreichende Qualität der Verkehrswege zu sichern, bedarf es eines Erhaltungsmanagementsystems, das mit Hilfe von Bauwerksinspektionen und Modellen zur Zustandsentwicklung verlässliche Vorhersagen zu Instandhaltungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen treffen kann und somit Finanzmittel rechtzeitig eingeplant und effizient genutzt werden können.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Untersuchungsziel ist durch den Titel des FuE-Verfahrens gegeben.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die Bearbeitung zeichnet sich durch eine interdisziplinäre und WSV-weite Arbeitsweise aus (BMVI, Koordinatoren für die Bauwerksinspektion, Bauwerksprüfer und alle Fachreferate der Abteilung Bautechnik der BAW Karlsruhe). Koordiniert wird diese durch die Projektgruppe Erhaltungsmanagement der Abteilung Bautechnik in der BAW.

Die Bearbeitung erfolgt stufenweise. Die Ergebnisse müssen den Belangen der Anwender entsprechen, weshalb enger Kontakt zur WSV gesucht und jedes Zwischenergebnis mit der WSV diskutiert wird.

Weiterentwicklungen werden in Kooperation mit Universitäten vorangetrieben. Für die Jahre 2013-2014 wurde mit einer FuE-Stelle in Kooperation mit der ETH Zürich die Integration von Instandsetzungsmaßnahmen in das EMS-WSV weiterentwickelt. Auf Grund des vorzeitigen Abgangs der FuE-Stelle konnten bis Ende 2014 nur Teilziele erreicht werden.

### **3 Ergebnisse**

In Phase 1 der Bearbeitung für ein Erhaltungsmanagementsystem der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung wurden modular verschiedene Schwerpunkte im Bereich der Bauwerksinspektion als Grundlage erarbeitet.

In der zweiten Phase des FuE-Projektes wurde ein Prognosemodell für die Zustandsentwicklung von Verkehrswasserbauwerken aufgestellt. Für die Verkehrswasserbauwerke wurde ein kombiniertes Verfahren mit Überlebensfunktionen zur Prognose ungeschädigter Strukturen und Markov-Matrizen zur Prognose vorhandener Schäden entwickelt. Die erforderlichen Parameter für die Funktionen wurden im Rahmen einer Expertenbefragung nach den Grundsätzen der Delphi-Methode ermittelt.

Die Prognosemodelle wurde in den Jahren 2011-2015 bei zahlreichen Projekten zur Zustandsprognose von Einzelbauwerken und Bauwerksgruppen bis hin zu Wasserstraßenabschnitten verwendet, siehe beispielsweise Bild 1. Diese Anwendung dient der Verifikation und der Optimierung der gewonnenen Ansätze. Darüber hinaus wurde die Bekanntheit und die Akzeptanz in der Verwaltung gefördert.

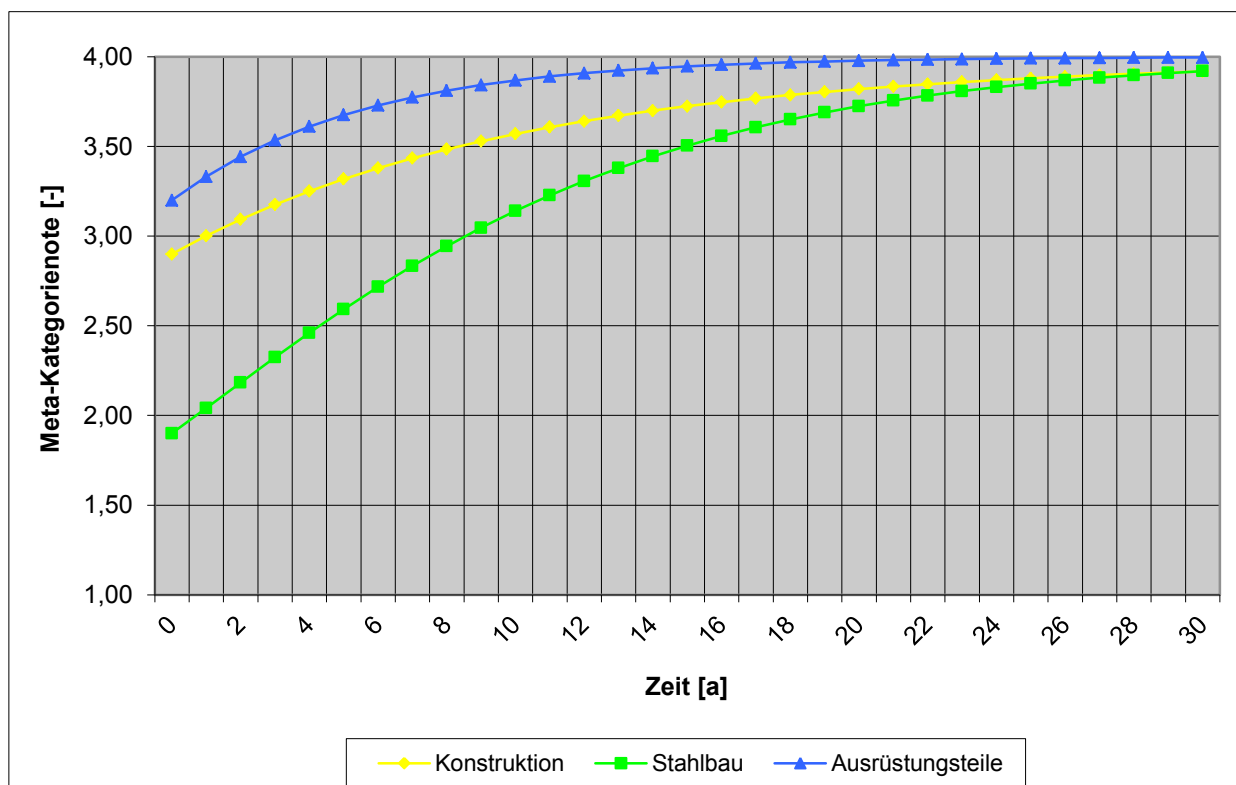


Bild 1: Prognose von drei Teilnoten auf Basis der Inspektionsergebnisse

In den Jahren 2010/2011 wurde eine umfangreiche Internet- und Literaturrecherche zu den folgenden Themen durchgeführt:

- Weitere Parameter zur Maßnahmenpriorisierung
- Instandsetzungsmaßnahmen und -kosten im Rahmen von Infrastrukturmanagementsystemen

Die Integration von Instandsetzungsmaßnahmen und –kosten bedarf weiterer Grundlagenarbeit, da in der WSV die Instandsetzungen nicht systematisch erfasst werden. In 2013 wurden im Rahmen einer Internet- und Literaturrecherche bestehende Ansätze und Vorgehensweisen zusammengetragen. Die gefundenen Verfahren lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- Top – Down: dabei wird über den Anlagenbestand der Instandsetzungsumfang abgeschätzt;
- Bottom – Up: dabei wird der Instandsetzungsumfang über Einzelmaßnahmen an den Objekten für den Gesamtbestand hochgerechnet.

Parallel wurden charakteristische Instandsetzungsmaßnahmen, deren Kosten und den dazu erforderlichen Personalbedarf zusammengetragen. Dies erfolgte im Wesentlichen im Rahmen von Experten-



gesprächen mit den Fachreferaten der Abteilung Bautechnik. Mittlerweile liegt für die Kategorien Stahlbau, Korrosionsschutz und Massivbau ein Katalog mit relevanten Instandsetzungsmaßnahmen vor.

Der WSV wurde empfohlen, die Ausschreibungs- und Abrechnungssoftware als Zentralversion zu betreiben und ein vorhandenes Auswertemodul zu erwerben, um zukünftig einfacher WSV-weit zu einheitlichen Kostensätzen für Positionen des Standard-Leistungskataloges zu kommen. Übergangsweise wurden Angebotspreise von Dienststellen mit Neubautätigkeit gesammelt und ausgewertet.

In einem weiteren Bearbeitungspaket wurden grundlegende Recherchen zum Thema Risikomanagement durchgeführt. Ziel war es zum einen, wesentliche Begrifflichkeiten des Risikomanagements für das Erhaltungsmanagementsystem zu definieren und zum anderen, Verfahren aus anderen Anwendungsgebieten zu extrahieren. Die Ergebnisse der Recherchearbeiten bilden die Basis für die Entwicklung einer pragmatischen Methode für eine risikoorientierte Klassifikation für die Verkehrswasserbauwerke.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016: Beendigung des Projektes und Fortführung in neuen, in sich abgegrenzten Teil-Projekten.

Laufzeit des Vorhabens: 2005 bis 2016.

#### **5 Literatur**

PIANC n° 129 (2013): Waterway Infrastructure Asset Maintenance Management. PIANC Report n° 129. Brüssel, 2013.

#### **6 Veröffentlichungen**

Kühni, K., Bödefeld, J., Kunz, C. (2008): EMS-WSV – Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke. Bautechnik 85 (2008), Heft 8, S. 514- 520.

Kühni, K. (2010): A Maintenance System for Waterway Infrastructures. PIANC MMX, Tagungsband, Liverpool.

Kloé, K., Bödefeld, J. (2012): Bauwerksinspektion an Verkehrswasserbauwerken. In: Bautechnik 89 (2012), Heft 5, S. 331-332.

Bödefeld, J., Kloé, K. (2012): Managementsystem for infrastructures at waterways. IALCCE 2012, Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Wien, 3.-6.Oktober 2012, Tagungsband

## **Ermittlung Kräfte bei Ankerwurf auf Kreuzungsbauwerke**

**Netzplan-Nr.:** A39510110178

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. (FH) H. Becker, Abteilung Bautechnik, Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** holger.becker@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Notsituationen in der Schifffahrt können trotz Ankerwurfverbots oftmals zum Werfen eines Ankers führen. Für Kreuzungsbauwerke unter der Wasserstraße wie z. B. Düker, Tunnel- oder Unterführungsanlagen ergibt sich hieraus ein Gefährdungspotenzial, welches im Schadensfall die Funktionsfähigkeit des Bauwerkes einschränkt (z. B. Volllaufen eines Tunnels mit Wasser) und bei Kanälen ferner zum Leerlaufen einer ganzen Kanalstrecke führen kann.

Während in der Vergangenheit eine Vielzahl von Untersuchungen zum Thema des auf dem Grund schleppenden Ankers durchgeführt wurde, sind zu Aufprallgeschwindigkeiten bzw. -kräften von Ankern keine Veröffentlichungen bekannt. Bisher erfolgte daher bei der Neuprojektierung von unterirdischen Kreuzungsbauwerken ein pauschalierter Ansatz der Auftreffgeschwindigkeit, aus welcher dann in Abhängigkeit von der Bauwerksgeometrie und weiteren Randbedingungen eine individuell geprägte statisch anzusetzende Ersatzlast ermittelt wurde. Während ein Neubau mittels der neu zu planenden Konstruktion hierauf abgestimmt werden kann, erfordert die Nachrechnung einer bestehenden Anlage einen realitätsnahen Ansatz, da hier vielfach in der Bemessung auf einen Ansatz des Lastfalles Ankerwurf verzichtet wurde und entsprechende Tragfähigkeitsreserven nur begrenzt vorhanden sind.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine Vielzahl von unterirdischen Kreuzungsbauwerken, besonders im Kanalnetz, wird von der WSV betrieben, bzw. ist in ihrem Besitz. Bei der Planung von Instandsetzungen an bestehenden Bauwerken wird daher die Frage nach der Sicherheit bei Ankerwurf auf das Kreuzungsbauwerk gestellt. Da diese in der Regel meistens nicht für diesen Lastfall bemessen wurden, müssen hierfür entweder Reserven in der Konstruktion aktiviert oder aufwändige Sicherungsmaßnahmen geplant werden. Zur Vermeidung einer unwirtschaftlichen Überbemessung infolge einer eventuell zu realitätsfernen Abschätzung von Ankergeschwindigkeit bzw. Aufprallkraft sind genauere Untersuchungen erforderlich.

Allerdings treten ähnliche Fragestellungen zunehmend auch im Zusammenhang mit dem Neubau von Kreuzungsbauwerken auf, bei denen die verantwortlichen Planer ebenfalls im Hinblick auf eine wirtschaftliche Bemessung nach realitätsnahen Ansätzen suchen.

Speziell sollen die Ergebnisse dieses FuE-Vorhabens für die Untersuchung der Ankerwurfsicherheit des Straßentunnels unter dem Nord-Ostsee-Kanal (NOK) angewendet werden, welcher in diesem Zusammenhang als Pilotprojekt fungiert. Um auch eine Anwendung der hieraus gewonnenen Erkenntnisse bei weiteren Kreuzungsbauwerken zu ermöglichen, werden im Anschluss daran die Untersuchungen für einen allgemein gültigen Berechnungsansatz ergänzt.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist die realitätsnahe Ermittlung von Ankergeschwindigkeiten beim Aufprall auf die Kanal- bzw. Flusssohle sowie die Entwicklung eines Bemessungsansatzes, welcher den Lastfall Ankerwurf genügend genau beschreibt.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die Methoden bestehen aus in situ Messungen sowie theoretischen Ansätzen.

Bei den in situ Messungen werden an einer ausreichenden Anzahl von Schiffen Geschwindigkeitsmessungen an fallenden Ankern durchgeführt, welche sowohl für Ankergröße sowie Ankertyp des

deutschen Fluss- und Kanalnetzes bis zur Größe der auf dem NOK verkehrenden Schiffe repräsentativ sind. Hierzu wird an den Ankerspills indirekt die Geschwindigkeit der über sie ablaufenden Ankerkette mittels aufgetragenen Magnetplättchen und elektronischem Zähler gemessen. Über eine Vergleichszählung beim Einholen des Ankers bzw. der Kette kann die korrekte Funktion des Zählwerkes überprüft werden. Vorteil der in Situ-Messung am Schiff gegenüber eines ebenfalls diskutierten Ankerwurfes von einer Einrichtung auf einem Schwimmponton ist die Berücksichtigung von Reibungseffekten von Kette (Kettenkammer, Kettenführung, Ankerklüse) und beweglichen Teilen (Ankerspill, Umlenkrolle über der Ankerklüse), welche die Geschwindigkeitsentwicklung u. U. erheblich beeinflussen.

In den theoretischen Ansätzen sollen physikalische Zusammenhänge aus der Ankerwurfgeschwindigkeit einen Bemessungsansatz liefern, welcher den dynamischen Vorgang zu einer statischen Bemessungslast vereinfacht und somit ein anwenderfreundliches Hilfsmittel zur Erfassung des komplizierten Sachverhaltes zur Verfügung stellt. Hierzu soll zunächst exemplarisch am Straßentunnel Rendsburg mittels dreidimensionaler FE-Modellierung die dynamischen Effekte untersucht werden. Evtl. unter zusätzlicher Untersuchung an weiteren FE-Modellen von Kreuzungsbauwerken erfolgt daraufhin die Entwicklung des Bemessungsansatzes. Zur Validierung der Ergebnisse aus den FEM-Berechnungen ist geplant, an einem Versuchsstand messtechnisch begleitete Ankerwurfversuche im Maßstab 1:1 durchzuführen.

### 3 Ergebnisse

Zur Erkundung der vorhandenen Ankergrößen für das Pilotprojekt Straßentunnel Rendsburg erfolgte eine statistische Auswertung der den NOK passierenden Schiffe. Hierbei wurden stichprobenartig bei rund 45 % der Schiffspassagen der Jahre 2004 bis 2006 die Ankergrößen ermittelt und somit die Verteilung der Ankergrößen bestimmt (Bild 1). Gleichzeitig erfolgte eine Auswertung der Unfallstatistik mehrerer Jahre auf dem NOK zur Ermittlung von Gefahrenzonen sowie der Unfallwahrscheinlichkeit über dem Straßentunnel Rendsburg.

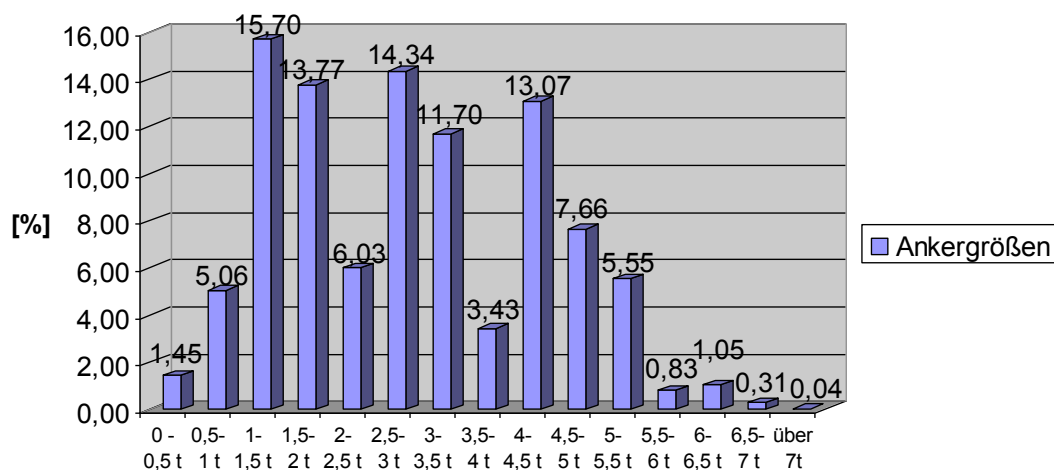


Bild 1: Verteilung der Ankergewichte auf dem NOK in den Jahren 2004 bis 2006 bei Auswertung von rund 45 % der Schiffspassagen

Des Weiteren fanden in Situ Messungen an WSV-eigenen Schiffen in der Nord- und Ostsee statt. Hierbei konnte die Geschwindigkeitsentwicklung beim Ankerwurf von Ankergrößen zwischen 1280 und 4300 kg untersucht werden. Es zeigte sich hierbei, dass, besonders bei großen Fallhöhen über Wasser, der Anker in der Luft schon eine größere Geschwindigkeit erreicht als seine spätere Grenzgeschwindigkeit im Wasser, was dann nach dem Eintauchen zu einem Abbremsvorgang auf besagte Grenzgeschwindigkeit führt. Bei den Versuchen konnte diese zwischen ca. 4,5 m/s als untere Grenze und ca. 5,5 m/s als obere Grenze bestimmt werden. Einflüsse der Ankergröße sind nach diesen Messungen als eher gering einzustufen; deutlich größeren Einfluss scheinen dabei solche aus Reibung zu haben. So konnte z. B. bei einem Schiff mit einer Führungsschiene für die Ankerkette anstelle einer Umlenkrolle die geringste Grenzgeschwindigkeit gemessen werden.

Literaturrecherchen zu artverwandten Problemen gaben Auskunft zu ähnlich gearteten Untersuchungen und Versuchsreihen mit stoßartigen, zumeist kurzzeitdynamischen Einwirkungen auf Bauwerke. Aufgrund der großen Ähnlichkeit zwischen Beanspruchung und Tragkonstruktion sei hier exemplarisch Steinschlag auf Schutzgalerien im alpenländischen Raum erwähnt, wozu in der Schweiz schon umfangreiche Untersuchungen durchgeführt wurden, welche dort in eine Richtlinie (ASTRA, 2008) zur Bemessung dieser Galeriebauten mündeten, die für eine erste Abschätzung von Lasten aus Ankerwurf herangezogen werden kann.

International sind unterschiedliche Ansätze zu Annahme oder Ermittlung von Ankergeschwindigkeiten und Ankerauftreffkräfte bekannt, exemplarisch erwähnt werden sollen z. B. die Niederlande sowie Japan. Aufgrund der Schwierigkeit, an die theoretischen bzw. versuchsgestützten Grundlagen für diese Ansätze zu gelangen und sich hierbei größere Differenzen, auch zu eigenen Ergebnissen (z. B. Ankergeschwindigkeit) ergeben, können diese im Wesentlichen nur informativ verwendet werden.

In Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr in München konnte das Eindringverhalten des für den Straßentunnel Rendsburg ermittelten Bemessungsankers an einem dreidimensionalen FEM-Modell simuliert werden. Die Simulation des Impaktvorgangs von Auftreffen bzw. Eindringen erfolgte über sogenannte Hydrocodes, bei denen für jeden Zeitschritt die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie gelöst werden und es dadurch möglich ist, hochdynamische Vorgänge im nichtlinearen Umfeld darzustellen. Über eine Sensitivitätsanalyse in Bezug auf Auftreffposition und Lage des Ankers beim Eindringen konnten unterschiedliche Gefährdungsbereiche der Tunneldecke lokalisiert und ggf. erforderliche Schutzmaßnahmen dimensioniert werden.

In einem zweiten Schritt erfolgte eine gezielte Untersuchung der soeben genannten Gefährdungsbereiche. Hierbei zeigte sich, dass starre Schutzmaßnahmen über der Sohlaufschüttung (z. B. Stahlbetonplatten) dazu führen können, dass eine „Energievernichtung“ durch Verformungsarbeit (z. B. der Aufschüttung) nur noch in deutlich geringerem Umfang stattfindet, und mehr Energie durch die Tunneldecke aufgenommen werden muss, welche somit stärker beansprucht wird. Weiche, d. h. nachgiebige Schutzmaßnahmen (z. B. Stahlplatten) sind hier effektiver und daher starren vorzuziehen. Die optimale Form der Energievernichtung ist allerdings eine verformungsfreundliche Aufschüttung, sofern die hierzu erforderliche Aufschüttungshöhe gegeben ist.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Die Erfahrungen, welche aus der projektbezogenen Aufgabenstellung beim Straßentunnel Rendsburg gesammelt wurden, sollen nun für die Bemessung von unterirdischen Kreuzungsbauwerken im deutschen Binnenwasserstraßennetz verallgemeinert und in einen anwenderfreundlichen Bemessungsansatz für Ankerwurf einfließen. Hierzu wurden schon Konstruktionen und Querschnitte typischer Kreuzungsbauwerke analysiert, welche dann in Form von FE-Modellen rechnerisch untersucht werden sollen. Ein Abgleich zwischen realer Eindringssituation und rechnerischen Randbedingungen der Modellierung mittels eines Versuchstandes wäre zwar noch wünschenswert und letztendlich auch erforderlich, kann derzeit infolge Ressourcenknappheit nicht realisiert werden. Derzeit werden sämtliche Untersuchungen und Erkenntnisse in einem Schlussbericht zusammengestellt.

Laufzeit des Vorhabens: 2007 bis 2016.

#### **5 Literatur**

ASTRA (2008): Einwirkungen infolge Steinschlags auf Schutzgalerien, Richtlinie herausgegeben vom Bundesamt für Straßen ASTRA, Abteilung Straßennetze, und SBB AG Infrastruktur Ingenieurbau, Ausgabe 2008 V2.01, Bern.

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Zwangsbeanspruchung bei dicken, gerissenen Stahlbetonquerschnitten**

**Netzplan-Nr.:** A39510170002

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Bödefeld, Abteilung Bautechnik,  
Projektgruppe Erhaltungsmanagement (B 5)

**Bearbeiterin:** Dipl.-Ing. K. Turner, Abteilung Bautechnik, Referat Massivbau (B 1)

**E-Mail:** joerg.boedefeld@baw.de, katrin.turner@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Stahlbetonbemessung unterscheidet Last- und Zwangsbeanspruchung. Bei der Bemessung für Zwangsbeanspruchung und bei der Überlagerung von Last- und Zwangsbeanspruchung bestehen noch Wissenslücken. Auf Grund fehlender Bemessungsansätze ist die Bemessung bisher sehr pragmatisch und an Erfahrungen angelehnt. Mit der Arbeit des Projektleiters wurde für die Beanspruchung aus frühem Zwang ein mechanisch konsistentes Bemessungsmodell durch die Formulierung als Verformungsproblem erreicht Bödefeld, J. (2010), Bödefeld, J. et al. (2012). Darauf aufbauend soll nun ein Bemessungsmodell für die späte Zwangsbeanspruchung (saisonale Temperaturunterschiede, Setzungen) entwickelt werden. Dafür muss der Risszustand, mit dem das Bauwerk die Hydratationsphase beendet, bekannt sein, um darauf aufbauen zu können. Für die spätere Zwangsbeanspruchung ist dann das viskoelastische Verhalten gerissener Stahlbetonbauteile von grundlegender Bedeutung. Aussagen über das Rissbild nach der Hydratationsphase sind aus Erfahrungen an massiven Verkehrswasserbauwerken bekannt, bisher aber nicht vorhersagbar. Berechnungsmodelle funktionieren bisher nur bis zum Risszeitpunkt, und das auch nur sehr grob auf Grund fehlender Ansätze für das viskoelastische Materialverhalten. Viskoelastische Ansätze existieren bisher nur für ungerissenen Beton. Für gerissene Stahlbetonbauteile konnten keine Ansätze gefunden werden. Dabei steht besonders das viskoelastische Verhalten des Verbundes im Fokus.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Verkehrswasserbauwerke werden aktuell zum größten Teil monolithisch gebaut. Die Bewehrungsansätze sind bisher sehr konservativ und an den Erfahrungen kalibriert. Mit einem mechanisch konsistenten Bemessungsmodell kann die Wirtschaftlichkeit dieser Bauweise verbessert werden, wobei zusätzlich ein besseres Verständnis des Tragverhaltens auch die Qualität und die Dauerhaftigkeit und damit die Nachhaltigkeit des Bauwerks verbessert.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist es, durch Versuche, Auswertung von insitu-Messungen und Berechnungen zu einem mechanisch konsistenten Bemessungsmodell für die Zwangsbeanspruchung zu kommen, das alle Phasen des Bauwerkslebens abdeckt (früher Zwang, später Zwang, Überlagerung Last).

### **2 Untersuchungsmethoden**

Da bisher keine Ansätze für das viskoelastische Verhalten gerissener Stahlbetonbauteile vorliegen, müssen großformatige Versuche durchgeführt werden. Parallel soll durch nichtlineare FE-Berechnungen das Problem analysiert werden. Die Simulation der Versuche und durchgeführter insitu-Messungen sollen dann zu einem Verständnis des Tragverhaltens führen. Daraus wird dann ein Ingenieurmodell abgeleitet.

### **3 Ergebnisse**

Das FuE-Projekt wurde Mitte 2011 gestartet. In der zweiten Hälfte 2011 liefen die Vorbereitungen und Beschaffungen zur Durchführung der großformatigen Versuche.

In 2012 wurden zwei Versuchsserien durchgeführt. Die erste Versuchsserie galt dabei als Tastversuch, um das Verhalten der Versuchseinrichtung sowie die verwendete Betonrezeptur zu analysieren und zu optimieren.

In der zweiten Versuchsserie wurden erste Erkenntnisse zum Verhalten der Stahlbetonbauteile gewonnen. Es werden jeweils zwei Stahlbetonbalken untersucht, einer wird zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur ausgeschalt, der zweite Balken wird bis zum Ausgleich mit der Umgebungstemperatur in Schalung und Dämmung belassen.

Es zeigt sich, dass das viskoelastische Verhalten des Körpers bis zum Risszeitpunkt sehr ausgeprägt ist und nach der Rissbildung deutlich zurückgeht. Bei der zweiten Versuchsserie wurden die Balken nachträglich mit Zwangsverformungen beaufschlagt. Der erste Balken wurde dabei bis zur Erstrissbildung beansprucht, der zweite Balken bis zum abgeschlossenen Rissbild. Auch hier zeigt sich eine sehr geringe Viskoelastizität nach der Rissbildung.

Bei der dritten Versuchsreihe, die 2013 durchgeführt wurde, sind Sollrissstellen eingefügt worden, um die Rissbildung zu steuern. Parallel sollten die Dehnungen an der Bewehrung entlang der Lasteinleitungslänge mit Hilfe von DMS erfasst werden. Es hat sich heraus gestellt, dass die Messtechnik modifiziert werden muss.

Daher wurden Kleinversuche durchgeführt und die Fehler in der Messtechnik sukzessive ausgemerzt. Parallel fanden Untersuchungen zum Einsatz von faseroptischen Messmethoden statt, die aber auf Grund der hohen Kosten und der fehlenden Erfahrungen auf diesem Einsatzgebiet verworfen wurden.

2014 wurde die vierte Versuchsreihe durchgeführt. Hier lag der Fokus auf der Rissbreitenänderung im Nutzungszeitraum. Die theoretischen Überlegungen zur Überlagerung von erhärtungsbedingten Zwangsbeanspruchungen mit Einwirkungen im Nutzungszeitraum wurden vorangetrieben. Insbesondere wurde der Zwangskraftabbau infolge Rissbildung untersucht.

Um den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf den Zwangkraftaufbau im Nutzungszeitraum und die zeitliche Veränderung der Verbundeigenschaft zu untersuchen, wurde in 2015 eine weitere Versuchsserie abgeschlossen. Ein weiterer Fokus lag auf der Quantifizierung der Verformungseinwirkung durch jahreszeitliches Klima.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016: Aufstellen des Ingenieurmodells, Auswertung, Überprüfung des Modells, Zusammenstellung

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2016.

#### **5 Literatur**

- Bödefeld, J.; Ehmann, R.; Schlicke, D.; Tue, N.V. (2012): Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten in Stahlbetonbauteilen infolge des Hydratationsprozesses – Teil 2, in: Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 2, S. 79-85
- Bödefeld, J.; Ehmann, R.; Schlicke, D.; Tue, N.V. (2012): Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten in Stahlbetonbauteilen infolge des Hydratationsprozesses – Teil 1, in: Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 1, S. 32 – 37
- Bödefeld, J. (2010): Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme, Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 92, April 2010

#### **6 Veröffentlichungen**

- Tue, N. V.; Schlicke, D.; Turner, K. (2014): Zwangsbeanspruchung unter Berücksichtigung der erhärtungsbedingten Spannungsgeschichte und weiteren Verformungseinwirkungen aus dem Nutzungszeitraum, in: Massivbau im Wandel - Festschrift zum 60. Geburtstag von Josef Hegger (2014), S. 451 – 462

Turner, K.; Schlicke, D. (2014): Zwangbeanspruchungen und Rissbreitenentwicklung im Nutzungszeitraum unter Berücksichtigung der erhärtungsbedingten Spannungsgeschichte, in: Nachhaltig Bauen mit Beton: Werkstoff und Konstruktion - Beton Graz'14, S. 247 – 254

## **Bemessungskonzept für Wasserbauwerke auf Erdbeben**

**Netzplan-Nr.:** A39510170003

**Projektleiter:** Dr.-Ing. H. Fleischer, Dipl.-Ing. G. Maltidis, Abteilung Bautechnik,  
Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** helmut.fleischer@baw.de, georgios.maltidis@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Wasserbauwerke der WSV liegen teilweise in relevanten Erdbebenzonen wie Bild NA.1 des Nationalen Anhangs DIN-EN 1998-1/NA:2011-01 zu Eurocode 8-1 zeigt. Betroffen sind danach Gebiete entlang des Rheins und an den Unterläufen von Neckar, Mosel und Lahn.

Bei Bauwerken mit besonders hohem Schadenspotential, z. B. Stauanlagen, sind unabhängig vom EC 8 Überlegungen zu Erdbebeneinwirkungen anzustellen, siehe z. B. DIN 19700-10, wonach im Regelfall seismologische Gutachten erforderlich werden. Aus diesem Grund hat Nordrhein-Westfalen ein Merkblatt Nr. 58 zur Erdbebenbelastung von Stauanlagen herausgegeben.

Die maßgebende Norm zur Erdbebenbemessung, der Eurocode 8, besteht aus mehreren Teilen, wobei der Teil 1 sich mit den Grundlagen und den Regeln für Hochbauten beschäftigt, die weiteren Teile enthalten besondere Regelungen für Ingenieurbauwerke wie Brücken, Silos, Türme usw. Besondere Vorschriften für Wasserbauwerke, wie sie in der WSV erforderlich wären, fehlen. Auch in der z.Z. geltenden Erdbebennorm DIN 4149 (2005) für übliche Hochbauten sind keine Vorgaben für Wasserbauwerke od. ä. enthalten.

Die ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen beziehen sich bei der seismischen Analyse von Wasserbauwerken insbesondere auf die Interaktion Bauwerk-Boden und auf die Mitwirkung fließenden und stehenden Wassers bzw. Grundwassers.

Der Stand des derzeitigen Wissens spiegelt sich im EC 8 wider, wonach Besonderheiten von Wasserbauwerken nicht behandelt werden. Der Teil 5 des EC 8, EN 1998-5 (Besondere Vorschriften betreffend Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte) behandelt einige bei Wasserbauwerken relevanten Gesichtspunkte. In einzelnen Fällen gab es gesonderte projektspezifische Überlegungen, z. B. Kanalbrücke Magdeburg oder die Nachrechnung der Schleuse Iffezheim/Rhein auf Erdbeben. Dabei wurden Regelungen für den Hochbau nach DIN 4149 (entspricht DIN EN 1998-1) ingenieurmäßig übertragen oder es wurden mechanische Überlegungen zur Mitwirkung des Wassers angestellt. Systematische Untersuchungen zu Wasserbauwerken liegen nicht vor.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Auch wenn nur ein Teil der WSV-Bauwerke in seismisch aktiveren Zonen (Bild 1) liegen, belegen doch Rückfragen der WSV bei der BAW die Notwendigkeit einer intensiven Beschäftigung mit diesem Thema, um künftig eine kompetente, dem Stand von Wissenschaft und Technik angepasste Vorgehensweise anbieten bzw. fachkundige Auskunft geben zu können. Wie oben dargelegt, fehlen wasserbauspezifische Regelungen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, die Besonderheiten von Wasserbauwerken unter Erdbebeneinwirkungen zu erforschen, die Gefährdung von WSV-Bauwerken wie Schleusen und Wehren infolge Erdbeben grundsätzlich zu bewerten und möglichst pragmatische wasserbauspezifische Regelungen zu entwickeln. Die Regelungen sollen sich an die Grundnorm DIN EN 1998-1 anlehnen. Insbesondere werden bei dem komplexen Gesamtverhalten des Bauwerkes und dessen Interaktion mit Baugrund und Wasser ingenieurpragmatische Vereinfachungen angestrebt und die zugehörigen Grenzen der Anwendbarkeit, z. B. konstruktive Ausbildung und Geometrie des Bauwerkes, Seismizität usw. angegeben.



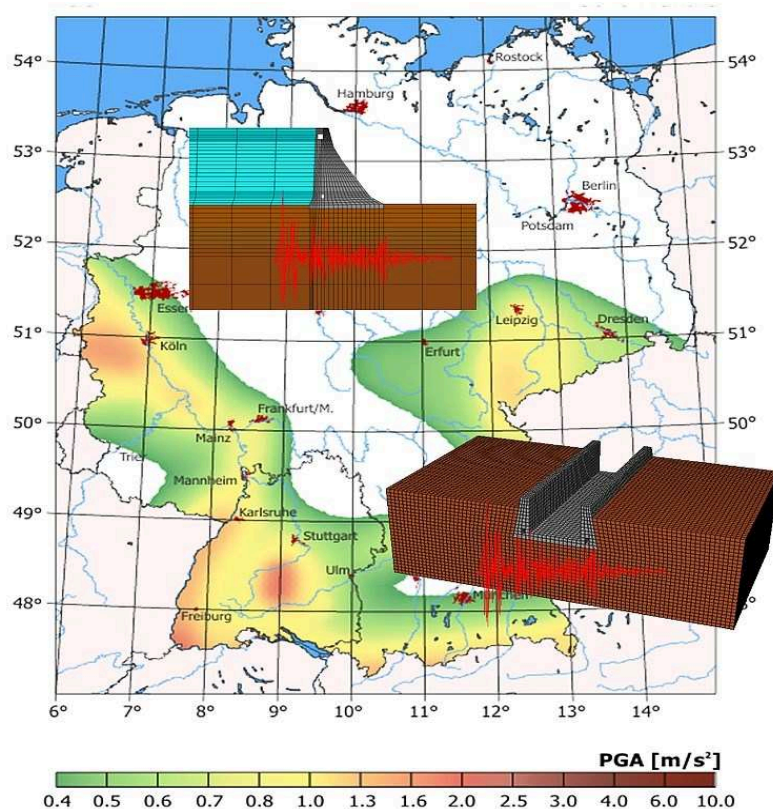


Bild 1: Seismisch aktive Zonen in Deutschland für  $T_a=2500$   
(Gefährdungskarte nach GFZ Potsdam)

## 2 Untersuchungsmethoden

Neben umfangreichen Literaturrecherchen werden grundsätzliche mechanische Betrachtungen zur seismischen Analyse von Wasserbauwerken angestellt. Dabei werden typische WSV-Bauwerke aus deutschen Erdbebengebieten zu Grunde gelegt und durch Variation der Seismizität und konstruktiven Ausbildungen die maßgebenden Parameter identifiziert und deren Einfluss herausgearbeitet. Die Haupttragwerke der Anlagen (Massivbau) stehen dabei im Vordergrund.

Es sind ausschließlich numerische Untersuchungen mit leistungsstarken FE-Programmsystemen, z. B. ABAQUS, vorgesehen. Auf Laboruntersuchungen soll möglichst verzichtet werden.

## 3 Ergebnisse

Nach Abschluss der Literaturrecherche wurden die ersten Berechnungen mit ABAQUS an einem Staumauerquerschnitt durchgeführt. Anhand der Berechnungen wurde der Einfluss des umgebenden Baugrundes und besonders des anstehenden Wassers als Besonderheit bei Wasserbauwerken überprüft und der Einfluss der Erdbebenbelastung auf die Standsicherheit von Staumauern getestet. Ferner waren zur realitätsnahen Tragwerksmodellierung entsprechende Stoffgesetze zu entwickeln, mit denen die Besonderheiten der zu untersuchenden Wasserbauwerke ausreichend berücksichtigt werden. Die Zwischenergebnisse konnten der Fachöffentlichkeit im Rahmen von Konferenzen und Kolloquien bereits vorgestellt werden (siehe unter 6., Veröffentlichungen).

Die Grundlagenuntersuchungen zur Erfassung des Systems Bauwerk – Boden – Wasser und besonders des Einflusses der Nachgiebigkeit der Wand auf die erdbebeninduzierten Wasser- und Bodendrücke konnten abgeschlossen werden. Beendet wurden weiterhin die seismischen Berechnungen verschiedener Verkehrswasserbauwerke. Hierzu wurden Kammern der Schleusen Iffezheim am Rhein und Fankel an der Mosel (Bild 2) ausgewählt und einer entsprechenden Analyse unterzogen. Von

besonderer Bedeutung sind dabei die Ergebnisse zur erdbebenbedingten Änderung der Boden- und Wasserdrücke in Abhängigkeit der statischen Randbedingungen (Bild 3)

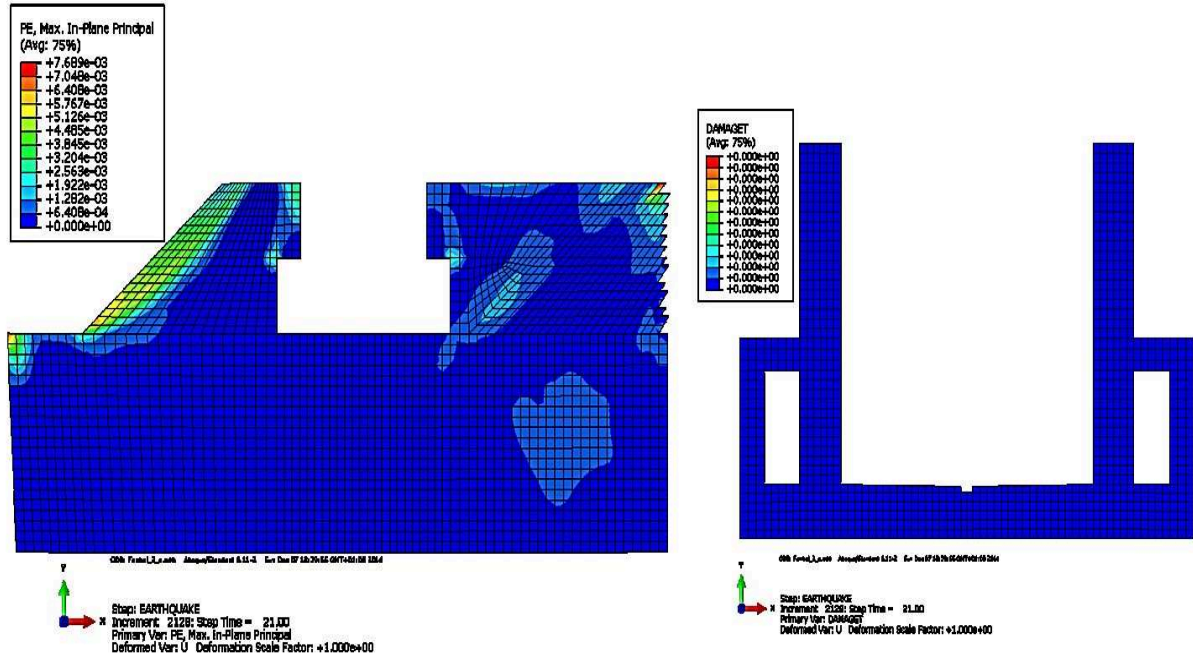


Bild 2: FEM-Modell zur seismischen Analyse der Schleuse Fankel mit Plastifizierungszonen infolge Erdbebenbeanspruchung

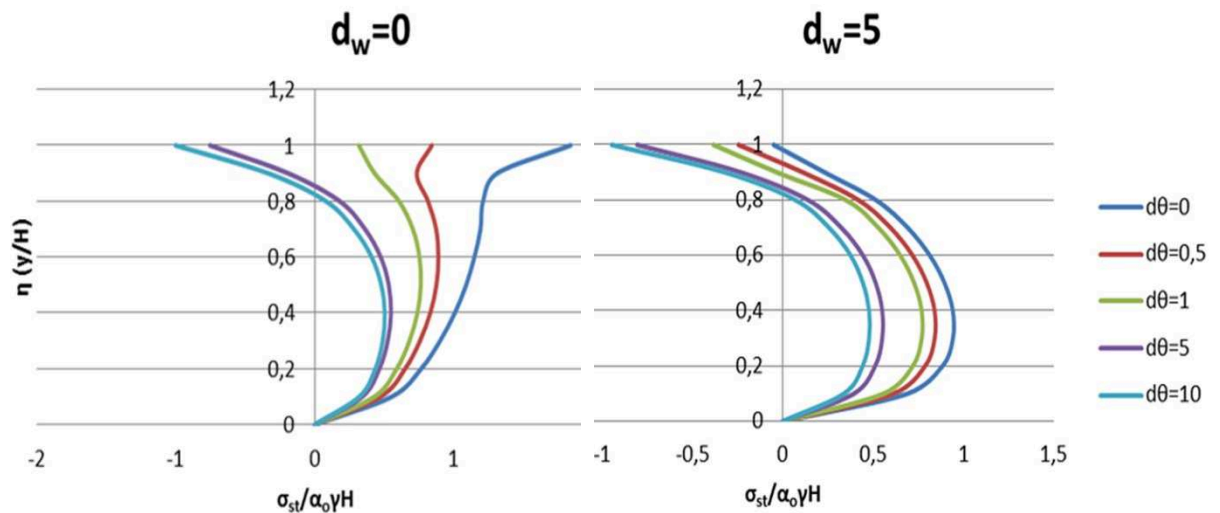


Bild 3: Höhenverteilung erdbebeninduzierter relativer Erddrücke an einer Schleusenammerwand in Abhängigkeit der Wand- und Bodensteifigkeit ( $d_w, d_\theta$ )

Letztendlich wurde ein großer Teil der bekannten Theorien aus der Literatur numerisch validiert und erweitert. Auf dieser Basis können Grenzbedingungen formuliert werden, unter denen bei der Bemessung von Wasserbauwerken im Rahmen von Neubaumaßnahmen oder bei Untersuchungen im Bestand Erdbebenbeanspruchungen unberücksichtigt bleiben können.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse mit Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

- Maltidis, G.; Stempniewski, L.; Fleischer, H. (2013): The influence of post-tensioned anchors to the seismic behaviour of an old masonry gravity dam, Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013), 28-30 August 2013, Vienna, Austria
- Maltidis G.; Stempniewski, L. (2013): Earthquake analysis of an old cyclopean concrete dam and its seismic retrofit with post-tensioning anchors, 9th ICOLD European Club Symposium, Venice, 10-12 April 2013 (Template Poster)
- Maltidis, G.; Stempniewski, L. (2013): Fluid Structure Interaction: Arch Dam - Reservoir at Seismic Loading, 12th International Benchmark Workshop On Numerical Analysis Of Dams, 2-4 October 2013, Graz, Austria.
- Maltidis, G. (2013): Earthquake analysis of an old cyclopean concrete dam and its seismic retrofit with post-tensioning anchors, 2. Griechische Konferenz für Talsperren und Stauseen, 7-8 November 2013, Athens, Greece. In Griechisch.
- Maltidis, G.; Stempniewski, L. (2012): Erdbebenbeanspruchung für Verkehrswasserbauwerke, *BAW-Kolloquium* Eurocodes für den Verkehrswasserbau – Bundesanstalt für Wasserbau, 8. Oktober 2012, Karlsruhe, Deutschland.

## **Entwicklung eines Verkehrslastmodells für typische Brücken der WSV**

**Netzplan-Nr.:** A39510170004

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. H. Becker, Dipl.-Ing. R. Ehmann, Abteilung Bautechnik,  
Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** holger.becker@baw.de, rainer.ehmann@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Mit der Einführung der DIN-Fachberichte für den Brückenbau wurden die bisherigen unterschiedlichen Brückenklassen für Straßenverkehr zugunsten eines einheitlichen Verkehrslastmodells aufgegeben, welches unabhängig von Straßenkategorie bzw. den Einwirkungsverhältnissen ist. In der Nachrechnungsrichtlinie für bestehende Straßenbrücken ist die Möglichkeit vorgesehen, in Abhängigkeit des täglichen Schwerverkehrs (DTV-SV) und der Art des Verkehrs (Ortsverkehr, Regionalverkehr oder Fernverkehr) bei bestehenden Straßenbrücken ein reduziertes Ziellastniveau in Anlehnung an die früheren Brückenklassen 60/30, 60/0 oder 30/30 zu bestimmen. Bei vielen schwach frequentierten WSV-Brücken würde die formale Anwendung dieser Richtlinie zu ungerechtfertigten Tragfähigkeitsdefiziten führen, da das Ziellastniveau höher als die Brückenklasse ist.

Die in der Nachrechnungsrichtlinie formulierte Methodik zur Bestimmung des Ziellastniveaus beruht auf Verkehrsmessungen an 3 verschiedenen Autobahnbrücken. Eine Übertragung auf untergeordnete Straßen und auf Brücken mit 2-spurigem Verkehrsquerschnitt ist unter diesen Voraussetzungen zu hinterfragen

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die WSV besitzt eine Vielzahl von Brücken alter Brückenklassen im untergeordneten Verkehrsnetz (mit und ohne Verkehrsbeschränkung), welche einer Nachrechnung gemäß der Nachrechnungsrichtlinie mit dem dort formulierten Ziellastniveau nicht standhalten und in weiterer Konsequenz durch einen Neubau ersetzt werden müssten. Aufgrund der vergleichsweise schwachen Frequentierung dieser oftmals als Wirtschaftswegbrücke oder im Ortsverkehr genutzten Bauwerke liegt die Vermutung nahe, dass der aktuell vorhandene und auch in Zukunft zu erwartende Verkehr mit den heute geltenden Lastmodellen überschätzt wird und viele der betroffenen Bauwerke nach wie vor ausreichend dimensioniert sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Untersuchungsziel ist, für die Straßenbrücken der WSV zutreffende Verkehrslastmodelle in Anlehnung an die aktuell für Neubau gültigen Belastungsmodelle nach Eurocode DIN EN 1991-2 bzw. nach alter Norm DIN 1072 zu ermitteln.

Durch Nachrechnungen bestehender, über 100 Jahre alter Brücken sowie durch die Zielsetzung des BMVI, die Nachrechnungsrichtlinie im ersten Schritt für Brücken im Zuge von Bundesstraßen einzuführen, wurde das Untersuchungsziel weiter präzisiert und den Anforderungen der WSV angepasst.

In die Betrachtungen einbezogen werden sollen sowohl bestehende Brücken (analog der Nachrechnungsrichtlinie) als auch eventuell abweichende Verkehrslastmodelle für Neubauten.

Bei den zu entwickelnden Verkehrslastmodellen ist wiederum zu unterscheiden zwischen dem Lastmodell für statische Nachweise (früher Brückenklasse genannt) und dem zugehörigen Ermüdungslastmodell.

### **2 Untersuchungsmethoden**

An ausgewählten Brücken der WSV werden die durch den laufenden Verkehr ausgelösten Bauwerksreaktionen gemessen. Gleichzeitig ist vorgesehen, den vorhandenen Verkehr in Menge, Fahrzeugart und Abstände der passierenden Fahrzeuge zu erfassen. Die Erstellung einer aussagekräftigen Mess-

konzeption erfolgt durch eine realitätsnahe Tragwerksmodellierung und Belastung mit entsprechenden Verkehrsszenarien. Eine Kalibrierung der rechnerischen Bauwerksreaktionen (Dehnungen, Verdrehungen usw.) erfolgt durch Vergleich mit gemessenen, die bei Überfahrten mit vermessenen und gewogenen Fahrzeugen in unterschiedlichen Konstellationen gewonnen werden. Das Messprogramm berücksichtigt die vorhandene messtechnische Ausstattung sowie die Verhältnisse und Möglichkeiten an der Brücke. Die Messdauer beträgt ca. 3 Monate bis zu einem Jahr, angepasst an das Brückenobjekt und den zugehörigen Randbedingungen. Die Messwerte der hochfrequenten Messungen sind entsprechend aufzubereiten und auszuwerten. Sofern messtechnisch erfasst, wird eine Verbindung zur zugehörigen Verkehrskonstellation hergestellt.

Die Messungen spiegeln das momentane zufällige Belastungsbild der Brücke wider. Ausgehend von der gemessenen Verkehrscharakteristik können durch statistische Betrachtungen und durch Simulationen andere Verkehrsszenarien und Verkehrszusammensetzungen berücksichtigt und deren Auswirkungen analysiert werden. Daraus wird dann ein angenähertes, auf der sicheren Seite liegendes Verkehrslastmodell entwickelt, welches alle Beanspruchungsarten (z. B. Querkraft, Biegemoment) und Bauteile (z. B. Längsträger, Fahrbahnplatte, Hänger usw.) gleichermaßen abdeckt.

### 3 Ergebnisse

Das FuE- Projekt wurde Mitte 2013 gestartet. Dazu wurden Forschungsk Kooperationen mit den Ingenieurbüros Prof. Dr. U. Freundt (IBF) und Dr. Schütz Ingenieure (DSI) eingegangen. Sechs Brücken der WSV wurden bisher als geeignete Untersuchungsobjekte ausgewählt:

1. Die Drucksbrücke überführt eine mit Schwerverkehr hoch belastete Landesstraße über den Dortmund-Ems-Kanal. Es handelt sich um eine stählerne Stabbogenbrücke mit einer Spannbeton-Fahrbahnplatte, bemessen für Brückenklasse 60/30. Im Zuge einer gutachtlichen Bearbeitung zur Ermüdungsgefährdung war eine Messeinrichtung für Dauermessungen installiert. Diese Messanlage wurde im September 2013 erweitert zur Erfassung der Verkehrsbelastung an maßgebenden Bauwerksteilen im Hinblick auf die Tragfähigkeit. Die Bearbeitung durch DSI ist abgeschlossen. Bei der Ermittlung der charakteristischen Verkehrsbeanspruchung wurden Bauwerksreaktionen einer 2-jährigen Dauermessung ausgewertet und klassiert und über eine ingenieurpragmatische Extremwertbetrachtung der 99,9%-Quantilwert errechnet. Um eine künftige Verkehrszunahme zu berücksichtigen, wurde ein Prognosefaktor, hier 1,11, durch Vergleichsbetrachtungen abgeschätzt. Es zeigt sich, dass die aus Messungen gewonnene charakteristische Verkehrsbeanspruchung inklusive Prognosefaktor maximal 60% der Brückenklasse 60/30 erreicht. Die Ermüdungssicherheit wurde durch Akkumulation der gemessenen Schädigungen einer 1-jährigen Dauermessung beurteilt. Danach kann ein Wichtungsfaktor  $\alpha_{fat}$  von 0,54 auf das normative Ermüdungslastmodell 3 (inklusive  $\lambda$ ) abgeleitet werden.
2. Die Dreierwalder Brücke bei Rheine kreuzt ebenfalls den DEK und überführt dabei eine Kreisstraße. Die 55m weit gespannte Stabbogenbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte wurde für die Tragfähigkeit einer Brückenklasse 30 bemessen, das Ziellastniveau gemäß Nachrechnungsrichtlinie soll BK 60 sein. Die Messeinrichtung wurde im März 2014 installiert und war dann über 4 Monate lang in Betrieb. Dabei wurden die Anzahl der Fahrzeuge, Anzahl, Abstand und Gewichte der Achsen sowie Geschwindigkeiten und Fahrzeugabstände gemessen. Die Simulationsrechnungen des Büros IBF und die Extremwertberechnung auf ein 99,9%-Quantilwert ergab, dass der aktuelle Verkehr ohne genehmigungspflichtigen Schwerverkehr durch BK 30 gerade abgedeckt wird. Der Wichtungsfaktor  $\alpha_{fat}$  für Ermüdung beträgt 0,56.
3. Bei der Stadtbrücke Riedenburg musste wegen Anrissen bei den Hängern eine Messeinrichtung zur Erfassung der Schädigung aus Wind und Verkehr installiert werden. Diese Messeinrichtung wurde analog der Drucksbrücke erweitert. Die Bearbeitung durch DSI mit der bei der Drucksbrücke verwendeten Methode ist abgeschlossen. Danach liegen die aus Messungen gewonnenen charakteristischen Beanspruchungen inklusive einem Prognosefaktor von 1,10 bei maximal 35% der BK 60/30. Der Wichtungsfaktor  $\alpha_{fat}$  für Ermüdung beträgt 0,26.
4. Durch die WSV veranlasste Nachrechnungen an über 100 Jahre alten Brücken über den Stichkanal Linden ergaben erhebliche rechnerische Ermüdungsdefizite bei Ansatz des normativen Ermüdungslastmodells 3. Zum Nachweis einer tatsächlich vorhandenen Ermüdungssicherheit und zur Erfassung der Belastungen für die Tragfähigkeit wurde im Oktober 2014 an der Brücke „Göxer

Landstraße“ eine Messeinrichtung analog zur Dreierwalder Brücke installiert und im Frühsommer 2015 beendet. Das Gutachten des Büros DSI wird im Februar 2016 fertiggestellt werden.

5. Eine weitere Messeinrichtung wurde im September 2015 an der Lingener Dammbrücke installiert und ist seither in Betrieb. Die Brücke überführt eine hoch belastete Bundesstraße über den DEK bei Rheine
6. Die nur für eine Brückenklasse 12/0 bemessene einspurige Brücke Herbrum überführt einen Wirtschaftsweg, welcher vermutlich von Fahrzeugen des Schwerverkehrs nur wenig frequentiert wird. Über eine Messanlage soll die Beanspruchung der Brücke mittels Langzeitmessung erfasst werden, um auch saisonalen Verkehr zu erfassen. Die teilweise schon Ende 2014 installierte Anlage wird Anfang 2015 ergänzt.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

- 2016: Fertigstellung der Gutachten für die Göxer Brücke und für die Lingener Dammbrücke und Aufbereitung der vorhandenen Erkenntnisse, evtl. Messungen an einer weiteren Straßenbrücke. An der Brücke Herbrum werden die Messungen weitergeführt und ausgewertet.
- 2017: Weitere Auswertungen und Erarbeiten von Empfehlungen für WSV-Brücken.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2018 (beantragt).

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

- Freundt, U.; Böning, S.; Hölzer, D. (2014): Messwertgestützte Ermittlungen von Verkehrslastmodellen für typische Brücken der WSV. BAW-Kolloquium 23. und 24. September 2014 in Karlsruhe.
- Schütz, K.G.; Schmidmeier, M. (2015): Messungsbasiertes Lastmodell für die Amperbrücke an der A96. Vortrag bei den Münchnern Stahlbautagen 2015, 12. und 13.11. 2015 Hochschule München (unveröffentlicht).

## **Entwicklung eines Ingenieurmodells zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit schubunbewehrter Stahlbetonquerschnitte bestehender Wasserbauwerke**

**Netzplan-Nr.:** A39510170005

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. M. Lutz, Bautechnik, Abteilung Bautechnik, Referat Massivbau (B1)

**E-Mail:** matthias.lutz@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

Im Rahmen der Nachrechnung von bestehenden Wasserbauwerken aus Stahlbeton muss immer wieder festgestellt werden, dass die Nachweisformate der geltenden Regelwerke (DIN 1045-1, DIN EN 1992-1-1 EC 2) hinsichtlich der Querkrafttragfähigkeit nicht erfüllt werden. Wegen unterschiedlicher Bemessungsmodelle weisen die Stahlbetonbauwerke, die auf Grundlage älterer Regelwerke bemessen wurden, im Allgemeinen nicht die erforderliche Querkraftbewehrung und damit die rechnerische Tragfähigkeit auf, die nach derzeit geltenden Normen vorliegen müsste. Ferner bleiben die Besonderheiten massiver Wasserbauwerke (z. B. Abmessung, Beanspruchung, System), die im Allgemeinen einen günstigen Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit haben, auch in aktuellen Bemessungsregeln unberücksichtigt.

Ziel ist es, ein praxisgerechtes Ingenieurmodell zur Abschätzung der Querkrafttragfähigkeit von WSV-Bestandsbauwerken zu erarbeiten, um diese unter Berücksichtigung ihrer wasserbauspezifischen Besonderheiten im Rahmen einer Nachrechnungsrichtlinie besser bewerten zu können

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Regelungen zur Querkraftbemessung von Stahlbetonquerschnitten haben sich im Laufe der Zeit mehrfach geändert. Obwohl der WSV zur Zeit keine Bauwerksschäden bekannt sind, die nachweislich auf Querkraftversagen zurückzuführen sind, weisen bestehende Bauwerke oftmals große Standsicherheitsdefizite auf. Das Bemessungsmodell für die Querkraft in der derzeit geltenden Massivbaunorm EC 2 ist ein halbempirisches Modell. Die Hauptparameter des Modells wurden durch Auswertung von Versuchen kalibriert, die vorwiegend mit Einzellasten und großen Schubschlankheiten durchgeführt wurden. Die tatsächliche Querkrafttragfähigkeit der meist dicken, plattenartig beanspruchten Wasserbauwerke wird oftmals unterschätzt. Die durchgeführten Untersuchungen von Prof. Tue ergaben, dass die Querkrafttragfähigkeit wesentlich von dem Spannungsverhältnis im Schubfeld abhängig ist. Es konnte bewiesen werden, dass die Querkrafttragfähigkeit bei Bauteilen mit Gleichstreckenlast unter sonst gleichen Randbedingungen deutlich höher als bei Bauteilen mit Einzellasten ist. Ursache hierfür ist die günstigere Momenten-Querkraft-Kombination im Schubfeld bei Gleichstreckenlast, so dass die Fortpflanzung der geneigten Risse im Schubfeld erst bei höheren Beanspruchungen stattfindet. Weiterhin spielt die Schubschlankheit eine große Bedeutung. Bei geringer Schubschlankheit kann sich der fachwerkartige Kraftfluss nach Erreichen der sog. Schrägrisslast in ein Sprengwerk umlagern, so dass die aufnehmbare Last weiter gesteigert werden kann, während dies bei großer Schubschlankheit nicht möglich ist.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Ein Großteil der WSV-eigenen Wasserbauwerke wurde auf Grundlage älterer Normen erstellt. Bei Nachrechnungen im Rahmen von Umbaumaßnahmen, Zustandsbewertungen oder der Neuerstellung statischer Berechnungen nach den schärferen, neuen Regeln weisen diese Ingenieurbauwerke oft rechnerische Defizite in der Querkrafttragfähigkeit auf, auch wenn sich die Bauwerke augenscheinlich in einem guten Zustand befinden. Wirksame Querkraftverstärkungen sind meist extrem aufwändig, greifen stark in die Bausubstanz ein oder aus konstruktiven Gründen überhaupt nicht möglich.

Mit Hilfe einer Bemessungsregel, die die wasserbauspezifischen Besonderheiten auf Grundlage der neueren Erkenntnisse realitätsnah berücksichtigt, könnte das Sicherheitsniveau bestehender Bauwerke besser eingeschätzt, Verstärkungsmaßnahmen besser dosiert bzw. unnötige Verstärkungen oder Stilllegungen vermieden werden. Sie soll in das BAW-Merkblatt zur Untersuchung der Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke eingebunden werden.

### 1.3 Untersuchungsziel

Erstellung eines praxisgerechten Ingenieurmodells zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit schubunbewehrter Bauteile unter Berücksichtigung ihrer wasserbauspezifischen Besonderheiten. Einbindung in das BAW-Merkblatt „Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke“

### 2 Untersuchungsmethoden

Die Bewältigung dieser Forschungsaufgabe erfolgt in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Nguyen Viet Tue vom Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz. Neben umfänglichen Literaturrecherchen werden grundsätzliche Parameter massiver Wasserbauwerke herausgearbeitet und beschrieben. In nichtlinearen FE- Simulationen werden grundsätzliche Erkenntnisse zum Tragverhalten gewonnen sowie eine Nachrechnung ausgewählter Versuchsergebnisse der Schubdatenbank durchgeführt. Sie dient ferner zur Ermittlung wesentlicher Versagenskriterien.

Auf Grundlage der Erkenntnisse wird ein Ingenieurmodell für die Nachrechnung schubunbewehrter bzw. gering schubbewehrter Wasserbauwerke erstellt. Zur Verifizierung werden experimentelle Untersuchungen an verschiedenen Balken ohne Querkraftbewehrung durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit den Modellansätzen verglichen.

Das Ingenieurmodell wird durch die Anwendung an einem ausgewählten Wasserbauwerk auf seine Anwenderfreundlichkeit geprüft.

### 3 Ergebnisse

In einem ersten Bericht vom Juli 2013 wurde ein allgemeiner Überblick über den Stand der Technik durch Analyse der derzeit vorhandenen wesentlichen Querkraftmodelle sowie der Bemessungsmodelle nach internationalen Normen erarbeitet und diskutiert. Es wurden deren resultierende Querkrafttragfähigkeiten verglichen und experimentell ermittelten Werten von Schubversuchen gegenübergestellt.

Weiter erfolgte ein Vergleich von Versagenszeitpunkten bei FEM-Berechnungen mit den Schubtragfähigkeiten nach Norm. Hier fällt auf, dass die Werte bei Ansatz von Einzellasten akzeptable Übereinstimmungen aufweisen, während das Lastniveau bei Gleichstreckenlast der FEM- Untersuchungen eine mehrfach höhere Schubtragfähigkeit aufweist.

Bei der aktuellen Entwicklung eines neuen Ingenieurmodells wird als Kriterium für die Begrenzung der Schubtragfähigkeit die Bildung eines kritischen Schubrisses definiert und Kriterien zu dessen Bestimmung vorgestellt (zweiter Bericht vom Dezember 2013). Analysiert wird das Spannungsverhältnis im gesamten Schubfeld unter Berücksichtigung der vorhandenen Biegekräfte. Der Mechanismus des Querkraftversagens, die Bestimmung der kritischen Stelle des Versagens in Abhängigkeit der vorhandenen (Biege- und Querkraft-) Beanspruchungen sowie die Querkrafttragfähigkeit werden für unterschiedliche Systeme und Belastungen betrachtet. Die rechnerisch ermittelten Querkrafttragfähigkeiten des neuen Modells werden mit Ergebnissen der Ansätze aus aktuellen Regelwerken und mit den Werten aus Schubversuchen verglichen.

Zur Bestätigung und weiteren Verbesserung der Modellvorstellungen wurden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz experimentelle Querkraftversuche geplant und in zwei Versuchsreihen durchgeführt. Ein wesentlicher Punkt war die Betrachtung des Einflusses der Biegebeanspruchung auf das Querkraftverhalten an unterschiedlichen Schubfeldtypen. Während bereits eine Vielzahl von Versuchsergebnissen an Einfeldträgern unter punktförmiger Belastung vorliegt, besteht die Besonderheit der aktuellen Versuche darin, dass auch gezielt das Tragverhalten von Einfeld- bzw. Kragträgern unter Streckenlast ermittelt wurde. Die versuchstechnisch schwierig aufzubringende Gleichstreckenlast wurde mit einem wassergefüllten Feuerwehrschauch erzeugt. Zur Auswertung wurden neben Standardverfahren auch ein optisches 3D-Verfahren herangezogen.

Ersten Vergleichen zufolge kann sowohl die Querkrafttragfähigkeit als auch die Versagensstelle in den untersuchten Balken durch den neuen Modellansatz gut beschrieben werden.





Bild 1: Versuchsaufbau Kragträger unter Gleichstreckenlast nach Querkraftversagen

In einer weiteren experimentellen Versuchsreihe wurde das neue Schubmodell für Durchlaufträger unter Streckenlast weiterentwickelt. Tue (2015) stellt die theoretische Entwicklung des aktuellen Ansatzes für die Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit sowie die Ergebnisse aller durchgeführten Versuchsreihen vor. Beim Vergleich der experimentellen Versuche mit den rechnerischen Ergebnissen können sowohl die Tragfähigkeit, die Rissbilder sowie die wichtigsten Einflussparameter wie die Betonfestigkeit für unterschiedliche statische Systeme sehr gut mit Hilfe des neuen Ansatzes erfasst werden.

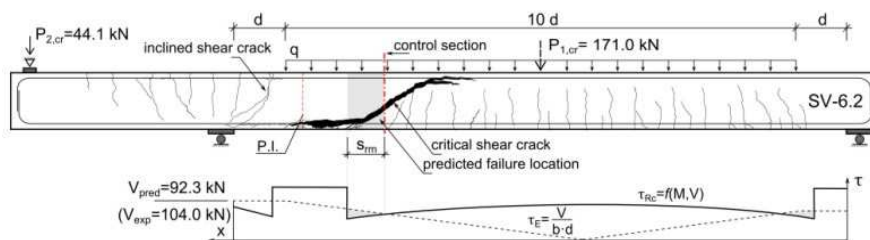


Bild 2: Querkrafttragfähigkeit nach dem vorgestellten Ansatz für Durchlaufbalken unter Gleichstreckenlast, Versuch SV-6.2. aus: Tue (2015)

Auf Basis des vorgestellten Ansatzes wurde ein Nachweisverfahren entwickelt, mit dem eine praxisorientierte Nachrechnung bestehender Bauwerke erfolgen kann. Das Nachweisformat wurde in eine Bemessungssoftware eingebunden und der BAW zur Verfügung gestellt.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015 / 2016 Einbindung der Erkenntnisse in eine Bemessungsregel zur Nachrechnung der älteren Wasserbauwerke, Anpassung von Sicherheitsbeiwerten und Materialparameter, Formulierung konstruktiver Randbedingungen

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2016.

#### 5 Literatur

Tue, N.V.: (2015): Bericht „Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung“. Institut für Massivbau, TU Graz, Dezember 2015 (unveröffentlicht).

#### 6 Veröffentlichungen

Tue, N. V., Theiler, W., Tung, N.D. (2014): Schubverhalten von Biegebauteilen ohne Querkraftbewehrung, Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 10.

Tue, N. V., Ehmann, R., Tung, N.D. (2015): Schubversuche an Stahlbetonbalken unterschiedlicher M/V-Kombinationen, Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Heft 7.

## **Korrosionsschutz von Stahl in Beton - Untersuchungen zum Kathodenschutz der Straßenbrücke B500 über den Rhein bei Iffezheim**

**Netzplan-Nr.:** A39510270002

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. G. Binder, R. Baier, Abteilung Bautechnik,  
Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

**Bearbeiter:** Ch. Tritschler, WSA Freiburg

**E-Mail:** guenter.binder@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die BAW hat den elektrochemischen Schutz der Stahlwasserbauwerke und Uferbefestigungen (Stahlspundwände) an den bundesdeutschen Wasserstraßen seit Jahrzehnten unterstützt und vorangetrieben. Das Grundprinzip hierbei ist die Einspeisung von Gleichstrom in das zu schützende Stahlbauteil zwecks Absenkung des elektrochemischen Potentials. Dieses Verfahren - Kathodischer Korrosionsschutz (KKS) - wird derzeit an der Straßenbrücke Iffezheim auch für Stahl in Beton angewandt. Die Elektrochemische Schutzmethode KKS-B wurde an der oben genannten Straßenbrücke zunächst erprobt, wobei die Umsetzung zum Jahreswechsel 2010/2011 erfolgte. Über einen Teilbereich der Brücke wurde der südliche Hohlkasten mit 2.050 Einzelanoden (im Unterschied zum gängigen Streckmetallgitter) in sechs Schutzbereichen ausgerüstet und über diese der notwendige Schutzstrom möglichst gleichmäßig eingespeist. Ein weiterer Teilbereich eines Hohlkastens der Brücke wird dabei mit einem gängigen flexiblen Streckmetallgitter aus MMO-aktiviertem Titannetz als flächige Fremdstromanode versehen. Mit variabler elektrischer Spannung, unter Verfolgung des Schutzstrombedarfs, kann man derartige Schutzstromanlagen entsprechend den Anforderungen auslegen und steuern. Gleichzeitig kann jeder Schritt durch ebenfalls eingebettete Mess- bzw. Bezugselektroden kontrolliert werden. Diese so genannte Potentialfeldmessung ist übrigens dem Verfahren ähnlich, mit dem bereits im Vorfeld die Schädigung der Bewehrung detektiert worden ist.

Neben dem großen Vorteil der ständigen Überwachung des Sanierungserfolgs (Absenkung des Korrosionsstromes gegen Null), diffundiert das schädliche Chlorid (Salz) durch das angelegte elektrische Feld von der Bewehrung weg, wodurch man sich schließlich eine aufwändige Betonsanierung in weiten Bereichen des Hohlkastens erspart. Die Möglichkeit eines Monitorings besteht in der Verfolgung der zeitlichen Entwicklung der Korrosionssituation durch eine Potentialfeldmessung mit  $\text{MnO}_2$ -Bezugselektroden (mit alkalischer Gelfüllung). Dieses Verfahren wiederum ist von einer Reihe von variablen Parametern abhängig und teilweise schwierig zu interpretieren.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) besitzt eine große Anzahl von Stahlbetonbrücken, u. a. auch so genannte direkt befahrene Brücken, die häufig durch Chlorideinwirkung und die dadurch erfolgte Depassivierung an der Bewehrung Schäden aufweisen. Ein Kathodischer Korrosionsschutz könnte dabei in vielen Fällen einerseits einen Neubau von geschädigten Brücken unnötig machen und andererseits die aufwändigen konventionellen Verfahren der Betonausbesserung und Reprofilierung ersetzen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Nach der Bestimmung einzelner Chloridprofile, des lokalen Zementgehaltes und des Bindemitteltyps unter Mithilfe der BAW und der RWTH Aachen im Vorfeld, wird ein Untersuchungsziel sein, möglichst viele Erfahrungen und Detailkenntnisse aus dem Betrieb der Kathodenschutz-Anlage der Brücke B 500 zu gewinnen, um die mögliche zukünftige Anwendung dieses Schutzverfahrens genauer und zielgerechter bei WSV-Bauwerken zu plazieren. Der Erkenntnisgewinn und die Untersuchungsergebnisse können langfristig auch als Grundlage für ein anvisiertes „Merkblatt KKS-B“ genutzt werden, an dem u. a. auch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein großes Interesse hat.

Mit dem Untersuchungsprogramm werden grundsätzlich, durch genaue Verfolgung der Messdaten vor Ort, Erfahrungen für die WSV gesammelt. Zudem kann man durch die Verfolgung des Wechsels der äußeren Bedingungen, deren Einfluss auf die Erfassung der Messdaten und deren Interpretation, erkennen und zukünftig den Aussagewert z. B. der Potentialfeldmessung verbessern.

## 2 Untersuchungsmethoden

Nach dem Anschließen aller Fremdstromanoden wurden gezielt Versuche gefahren, die Aufschluss über die letztendliche Anodenanordnung, Treibspannung, Stromdichte und Auslegung der Kathodischen Schutzanlage liefern sollten. Eine noch nicht im Detail bekannte Größe ist die exakte Einordnung der gemessenen Potentialwerte. Neben der Betonart (Bindemitteltyp) und der Betondeckung gelten die Betontemperatur und seine Feuchtigkeit als maßgebliche Einflussparameter. Zur Verfolgung der variierenden Feuchtegehalte ist eine neuartige Ringelektrode eingesetzt worden. Diese Multiringelektrode bestehen aus acht Edelstahlringen (1.4571,  $d = 20,0 \text{ mm}$ ,  $h = 5,0 \text{ mm}$ ), die mit einem Achsabstand von  $5,0 \text{ mm}$  untereinander angeordnet sind und mit einem Pt1000 Temperaturfühler versehen ist. Zwischen zwei Edelstahlringen wird jeweils ein Polyethylen-(PE)-Isolerring eingebaut. Durch Messung des Wechselstromwiderstands ( $100 \text{ Hz}$  bzw.  $1000 \text{ Hz}$ ) zwischen zwei benachbarten Ringen kann ein Widerstandsprofil über die Einbautiefe des Sensors aufgezeichnet werden. Dabei ist eine Temperaturkompensation der gemessenen Betonwiderstände [ $\text{k}\Omega$ ] mit Hilfe der Betontemperatur (gemessen auf Höhe des innersten Rings), eine Umrechnung in spezifische Elektrolytwiderstände [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] über die Zellkonstante möglich. Die hierbei erzielten, zum Teil widersprüchlichen Widerstandsverläufe werden nochmals gezielt überprüft und ggf. im Bereich der Ringelektroden gezielt und kontrolliert mit Wasser, zur Erhöhung von Beton- und Luftfeuchte benetzt. Ferner sollen vergleichende Potentialfeldmessungen von außen vorgenommen werden und deren Verschiebungen gegenüber den Messungen innen, nahe an der schlaffen Bewehrung, verfolgt werden. Auch eine stationäre elektronische Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit an insgesamt vier Stellen im Innern der beiden Hohlkästen ist vorgesehen.

## 3 Ergebnisse und weiteres Vorgehen

Im Frühjahr 2011 wurde die KKS-B-Anlage an der Straßenbrücke Iffezheim (B 500) in Betrieb genommen. Dabei wurde in zeitlichen Abständen die Funktionstüchtigkeit der Anlage durch Messungen der Potentialfeldwerte im Betrieb bzw. der tatsächlichen lokalen Schutzwirkung durch die Ermittlung der Ausschaltpotentiale und der dadurch erzielten Depolarisation ( $> 100 \text{ mV}$ ) nach DIN EN 12969:2000-06 bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl an den diskreten Einzelanoden als auch in dem Bereich der Streckmetallgitteranoden die Ergebnisse auf nahezu optimalen Schutz hinweisen. Die Ausschaltpotentiale lagen dabei in Bereichen von  $-210$  und  $-450 \text{ mV}$  für den östlichen Bereich (D) und bei  $-150$  bis  $-450 \text{ mV}$  für den westlichen Bereich (F) der Brücke (Messelektrode:  $\text{MnO}_2$ ). Zudem ist festzustellen, dass die Ausschaltpotentiale oberhalb des Grenzpotentials für Spannbetonglieder gemäß DIN EN ISO 12696 und somit auf der sicheren Seite hinsichtlich einer möglichen Wasserstoffversprödung liegen. Das  $100 \text{ mV}$ -Funktionskriterium für die gemessene Depolarisation nach 24 Stunden konnte mittlerweile für alle vier Messbereiche beider Brückenteile (0m D, 26m D; 0m F, 26m F) erfüllt werden. Die angelegte Treibspannung ( $4,45 \text{ V}$ ) und der davon abzuleitende Schutzstrom konnte ursprünglich beibehalten werden (Bruns, M., Binder, G., 2013) und haben sich zwischenzeitlich reduziert.

Bei Nichteinhaltung des Schutzpotenzials (s. Kontrolle durch Ausschaltmessung) wird entsprechend über die Stromzufuhr korrigiert ( $U_{\text{konst.}} = (R \times I)_{\text{konst.}}$ ). Da besonders der Betonwiderstand durch Temperatur und Feuchte beeinflusst wird ( $R \sim 1/\text{rel. F\%}$ ), werden zusätzlich die Temperatur und die Luftfeuchte bzw. vor allem die Betonfeuchte (indirekt durch die Widerstandsmessung der Ringelektroden) gleichzeitig erfasst. Zur Kontrolle von Feuchteverteilung in der Betonrandzone sind jeweils am Anfang (0m) und Ende (26m) des östlichen und westlichen Hohlkastens je zwei „Multiringelektroden“ angebracht worden. Aus den Langzeitbetrachtungen sind insbesondere die Einflüsse der Temperatur, Feuchtigkeit und der Betondeckung auf die Potentialfeldmesswerte wie auch letztlich auf die Stromverteilung bzw. den benötigten Schutzstrom abzuleiten bzw. zu bestimmen.

Die aktuell zur Verfügung stehenden Daten lassen Folgendes erkennen: Der Betonwiderstand (derzeit qualitative Angaben Ohm) bei 0mF und 26mF ist z.T. deutlich geringer und damit der eingebrachte

Schutzstrom z.T. deutlich höher als bei den Messpunkten 0mD und 26mD. Die Darstellung in Bild 1 zeigt die Zusammenstellung von veränderten Parametern (Strom/Widerstand) der Jahre 2011 bis 2015. Hierbei wurde der Strom (durch den Wartungsdienst) im Zusammenhang mit der natürlichen Variation des Widerstandwertes des Betons verändert. Dabei zeigen gerade die Messwerte bei 26mD einen systematischen Zusammenhang zwischen diesen Parametern, wobei die Ausgleichsgerade nahezu identisch mit der theoretischen Linie  $(R \times I)_{\text{konst.}}$  liegt. Darüber hinaus zeigt sich am Messpunkt 26mD auch eine signifikante Korrelation (statist. Sicherheit > 95%). Als Ergänzung dieser Zusammenhänge wurden noch die absoluten Wassergehalte (errechnet aus der gemessenen rel. Luftfeuchte und der Temperatur des Hohlkastens) gegen die Widerstandswerte der Ringelektrode angetragen (Bild 2). Zunächst kann man hier deutlich den jahreszeitlichen Einfluss (Sommer: hoher Luftfeuchtegehalt) erkennen. In dem Variationsdiagramm kann zudem auch eine zu erwartende statistisch gesicherte Abhängigkeit (stat. Sicherheit ~ 99%) abgeleitet werden.

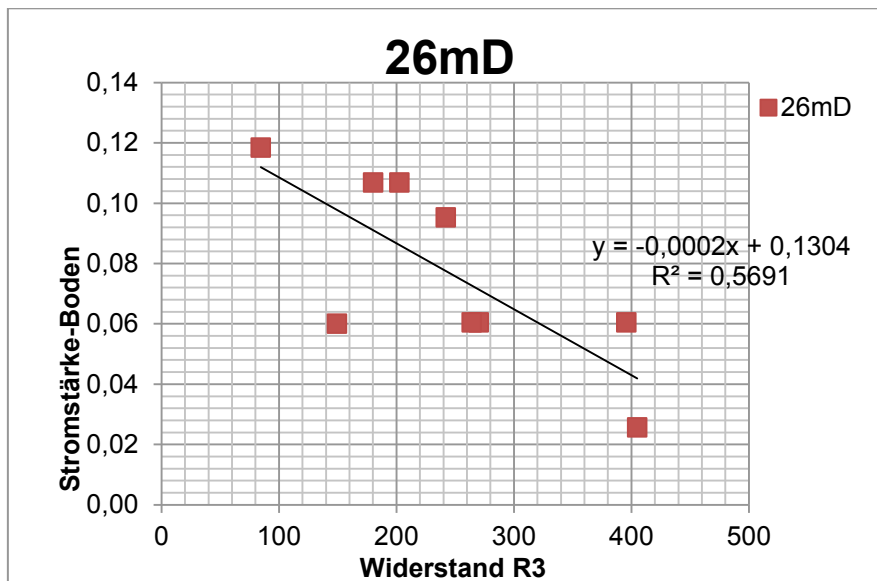


Bild 1: Abhängigkeit der Stromstärke  $I$  [A] vom Betonwiderstand  $[\Omega]$

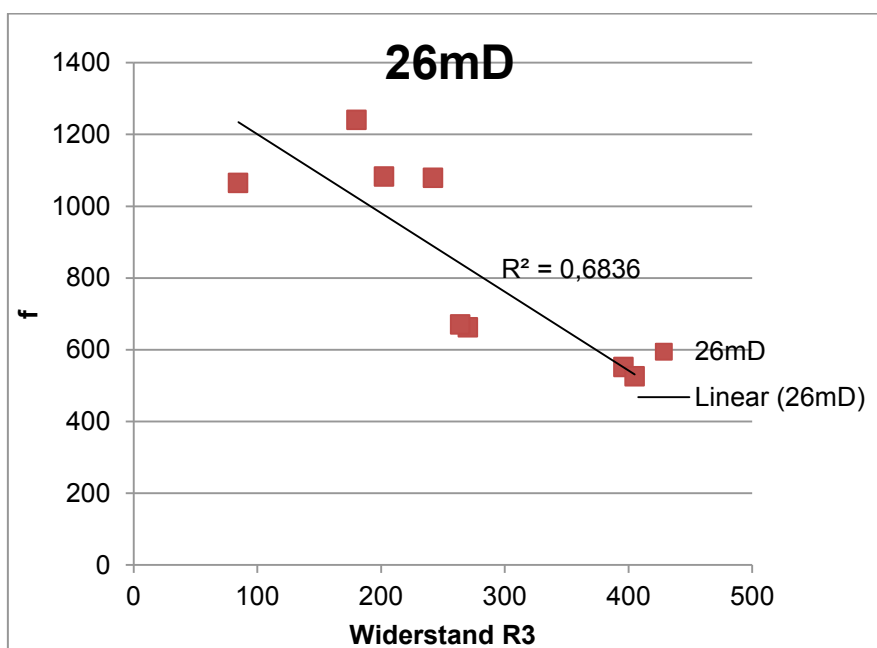


Bild 2: Abhängigkeit der Luftfeuchte  $f$  (mg/L) vom Betonwiderstand  $[\Omega]$

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

- Messwertverfolgung nach künstlicher Anhebung der Betonfeuchte durch Rehydratisierung nach Wasserbeaufschlagung (evtl. 2016; Genehmigung des WSA hinsichtlich der Gewährleistung des Anlagenerrichters erst noch einzuholen).

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2017.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

Bruns, M., Binder, G.(2013): Umsetzung des Kathodischen Korrosionsschutzes an den Spannbetonüberbauten der Schleusenbrücke Iffezheim; Beton- und Stahlbetonbau, 108 (2013) 2, 104 - 115

## **Korrosionseigenschaften von Spundwandstählen**

**Netzplan-Nr.:** A39510270003

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. G. Binder, Abteilung Bautechnik,  
Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

**E-Mail:** guenter.binder@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Korrosion von Spundwänden ist bedingt durch den Stahltyp, die Standzeit, das Immersionsmedium und der Tiefenlage bzw. Immersionszone. Von etwa 40 Bauwerken verschiedener Lokalitäten Deutschlands mit unterschiedlichen Standzeiten und Gewässertypen (Binnen-, Brack- oder Meerwasser) liegen mittlere Abrostungsdaten zum Vergleich vor. Bisher wurde bereits der Zusammenhang der Abrostung von Spundwandbauwerken mit zunehmender Standzeit untersucht. In Ergänzung dazu wurden Abrostungsmessungen mittels Ultraschall zur Bestimmung der Korrosionsraten durchgeführt und versucht Zusammenhänge mit den gemessenen Wasserparametern herzustellen. Hierzu wurde bisher vor allem die Bewertungszahl  $W_0$  für die Korrosivität von Gewässern nach DIN 50929 (Teil 3; 1985) und der Sauerstoffgehalt DIN 50929 (Teil 3, Beiblatt 1; 2014) verwendet. Weiterhin wurden auch die chemischen Zusammensetzungen der verschiedenen Stähle nach ihrem Alter untersucht, Binder, G., Gabrys, U. (2011); Houyoux et.al (2007).

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) besitzt eine Vielzahl von Spundwandbauwerken (z. B. Uferbefestigungen oder Schleusen). Wenn die Korrosion besser diagnostizierbar wäre, könnten z. B. Standzeiten von Spundwandstählen besser vorhergesagt werden. Bei zu geringer errechneter Standzeit wären dann bauliche Veränderungen anzustreben um die Standzeit zu erhöhen. Zudem müssten seltener teure und zeitaufwendige Ultraschallmessungen an den Bauwerken durchgeführt werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Durch elektrochemische Bestimmung der Korrosionseigenschaften vorliegender Stahlproben soll im Laborverfahren (Korrosionsmesszelle bzw. KMZ) deren generelle Anwendbarkeit und der Zusammenhang mit den realen Abrostungsverhältnissen überprüft werden. Damit können die Einflüsse der Stahlzusammensetzung sowie der unterschiedlichen Immersionsmedien dieser Bauwerke nachvollzogen werden und die maßgeblichen Einflussparameter erfasst werden. Untersuchungsziel wird sein, möglichst viele Erfahrungen und Detailkenntnisse der Korrosion von Spundwandstählen zu sammeln, um Laborversuche naturgetreuer nachbilden zu können und die Korrosion besser vorhersagen zu können. Hierbei könnten auch mikrobielle Korrosionsaspekte (MIC) Berücksichtigung finden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Erster Ansatz ist die Durchführung und Anpassung von Laborversuchen und der Vergleich mit Abrostungsraten in der freien Natur. Es werden Versuche mit einer Korrosionsmesszelle durchgeführt, in welcher die Stromdichte-Potential-Kurven verschiedener Stahlproben unter unterschiedlichen Gewässerbedingungen (Salinität, Sauerstoffkonzentration, Temperatur u. a.) aufgenommen werden können, aus welchen die theoretische Abrostungsgeschwindigkeit nach dem Faradayschen Gesetz berechnet werden kann.

### **3 Ergebnisse**

Als Standardversuchsbedingungen bei allen Versuchen wurde sich an die American Society for Testing and Materials (ASTM G5 – 87) angelehnt. Als Standardtemperatur für die Versuche wurden 20° C gewählt. Beim Magnetrührer wurden 200 rpm als Standard festgelegt was in etwa einer Fließgeschwindigkeit von 1,7 km/h entspricht. Dies ist ein Wert zwischen der Strömungsgeschwindigkeit z. B. des

Rheins mit ca. 7 bis 8 km/h und den Kanälen wie z. B. dem Mittellandkanal wo nahezu keine Strömung vorzufinden ist.

In Vorversuchen wurden verschiedene Rahmenparameter überprüft, auf welche hier nicht näher eingegangen werden soll

Bei Versuchen in Rheinwasser war sehr gut zu erkennen, dass mit steigender Temperatur die Sauerstoffkonzentration fiel. Bei der Auswertung wurde allerdings deutlich, dass der Effekt der Temperaturerhöhung stärker ist als der Effekt der Verringerung der Sauerstoffkonzentration womit die in der KMZ ermittelte Abrostungsrate mit der Temperatur weiter ansteigt.

In einer Versuchsreihe wurde untersucht, ob der DOC (gelöster organischer Kohlenstoff) einen Einfluss auf den Korrosionsstrom bzw. die Korrosionsrate in der Messzelle hat. Dies wurde mit drei verschiedenen DOC-Quellen (Gallussäure, Salicylsäure und 2,4-Dihydroxybenzoesäure) und zwei verschiedenen Modelllösungen (30 mmol Natriumchlorid und 10 mmol Natriumsulfat) überprüft. In allen Fällen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede beim Korrosionsstrom. Der Einfluss von Organik wird derzeit noch in weiteren Testreihen untersucht.

Die experimentell ermittelten Abrostungsraten lagen bei Versuchen mit Wasser aus dem Rhein im Bereich von 70  $\mu\text{m/a}$ . Dies entspricht in etwa den von der BAW gemessenen Abrostungsraten im Mittellandkanal (MLK) nach einer Standzeit von acht Jahren und darüber. Allerdings ist im MLK eine ständig hohe Salzfracht zu verzeichnen. Aus den Daten aus einem vorherigen Forschungsprojekt, Binder, G., Gabrys, U. (2011) ergeben sich dementsprechend für Binnengewässer Abrostungsraten, die weitaus niedriger liegen.

Bei Versuchen mit Brackwasser nach DIN 50905-4 ergab sich eine theoretische Abrostungsrate von ca. 180  $\mu\text{m/a}$ . Als Mittelwert der Abrostungsrate der 13 Brackwasserbauwerke aus dem voran gegangenen Forschungsprojekt ergibt sich ebenfalls ein niedrigerer Wert mit ca. 70  $\mu\text{m/a}$ . Das Brackwasser nach DIN hat eine elektrische Leitfähigkeit (ELF) von 12 mS/cm, während sich die ELF bei den Bauwerken in der Natur zwischen 8,0 und 26,9 mS/cm bewegt.

Zudem wurden Versuche mit 15 verschiedenen Spundwandstählen durchgeführt. Diese wurden nach deren Auffälligkeiten in ihrer chemischen Zusammensetzung von den insgesamt 41 vorliegenden Proben ausgewählt.

Bei Versuchen in zwei verschiedenen Modelllösungen (10mmol  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  und 30mmol  $\text{NaCl}$ ) zeigten sich deutliche Unterschiede in den ermittelten Abrostungsraten der 15 Spundwandstahlproben. Zusammenhänge zwischen der chemischen Beschaffenheit der Stahlprobe und der ermittelten Abrostungsrate konnten allerdings nicht gefunden werden. Anzumerken ist, dass alle überprüften Spundwandstähle in beiden Modelllösungen dasselbe Ranking aufweisen und die Abrostungsraten in der  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Lösung durchgehend höher sind als in der  $\text{NaCl}$ -Lösung. In Veröffentlichungen lassen sich Einflüsse von Legierungen bei niedrig legierten Stählen in Laborexperimenten finden, Choi et al. (2004).

Mit allen 15 Proben wurden Versuche in einem Immersionsmedium durchgeführt, welches der Natur angepasst werden sollte. Hierfür wurde Meerwasser und Brackwasser nach DIN auf die entsprechende ELF der Lokalität verdünnt. Bei einer ELF in der Natur unter 12 mS/cm wurde das Brackwasser verwendet, bei den restlichen Proben Meerwasser. Generell zeigte sich eine deutliche Erhöhung der Abrostungsraten in der KMZ gegenüber der Natur (hier: Immersionszone bei mittlerer Abrostung). Die Darstellung der Wertepaare im Variationsdiagramm zeigte eine gewisse systematische Korrelation (bei Weglassen einer Probe mit Verdacht auf Ausreißer), wodurch sich ein (einheitlicher) Faktor von etwa 10 ergäbe, Binder (2015), vgl. Bild 1. Eine Differenzierung nach Alter der Spundwände muss noch erfolgen.

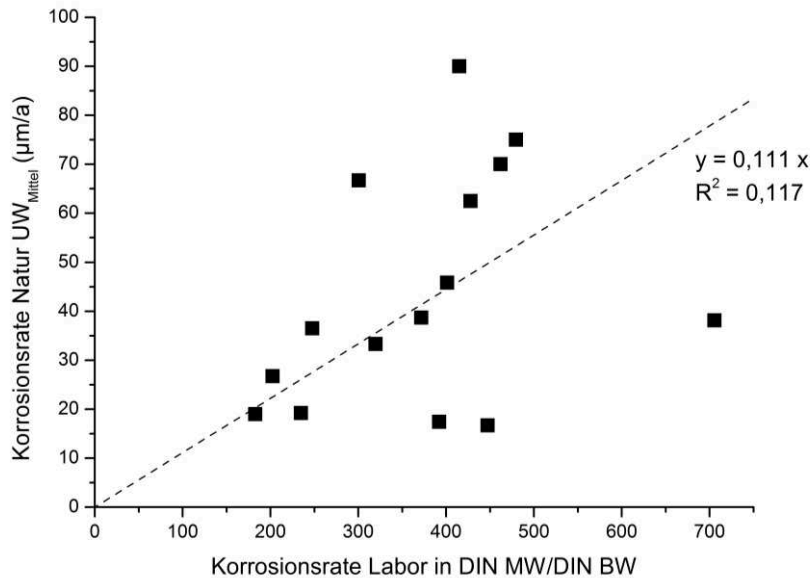


Bild 1: Korrosionsrate (UW) der Probe in der Natur über der entsprechenden Korrosionsrate im Labor in DIN BW/MW (KMZ)

Die Korrosionsströme wurden zudem mit einer 2010 von Paul (2010) veröffentlichten Formel, welche für Meerwasser gültig ist, verglichen. Hierbei zeigt sich eine gute Übereinstimmung des berechneten Korrosionsstromes nach Paul (2010) mit dem bestimmten Korrosionsstrom aus den Versuchen.

Zudem wurden Versuche mit Wasser aus dem Rhein, der Nordsee und dem Atlantik durchgeführt und ebenfalls der  $W_0$ -Wert bestimmt.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016:

Der Zusammenhang der ermittelten Abrostungsraten zwischen KMZ und Natur wird mit Methoden der Statistik noch näher untersucht, um einen einheitlichen Faktor zu eruieren. Z.B. ist eine Unterscheidung nach Alter der Spundwände durchzuführen.

Überarbeitung der vorliegenden Entwurfsfassung und Zusammenstellung dieser zu einem Abschlussbericht.

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2016.

#### 5 Literatur

- American Society for Testing and Materials: ASTM G5 – 94 (2011): Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements; 2011
- Binder, G., Gabrys, U. (2011): Bewertung der Korrosion von Spundwänden. FuE-Forschungsvorhaben der BAW; A39510210108..
- Choi et. Al. (2004): Corrosion behavior of low alloy steels containing Cr, Co an W in synthetic potable water; Materials Science and Engineering.
- DIN 50905, Teil 4 (1987): Korrosionsuntersuchungen; Durchführung von chemischen Korrosionsversuchen ohne mechanische Belastung in Flüssigkeiten im Laboratorium; 1987.
- DIN 50929, Teil 3 (1985): Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung; Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern; 1985.
- DIN 50929, Teil 3, Beiblatt 1 (2014): Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung; Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern; 1985
- Houyoux, C. et.al (2007): Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. Technical steel research.



Paul, S. (2010): Model to study the effect of composition of seawater on the corrosion rate of mild steel and stainless steel; Journal of Materials Engineering and Performance.

## **6 Veröffentlichungen**

Poster-Veröffentlichung, Vergleich der Abrostungsraten von Stahl zwischen Natur und Labor; Jahrestagung Gesellschaft für Korrosionsschutz e. V. (GfKORR); Frankfurt 6./7. November 2012

Binder, G (2015): Zulassungs- und Eignungsprüfungen von Beschichtungsstoffen – Vergleich Labor/Natur; Vortrag bei der Fachtagung Bundesverband Korrosionsschutz, Köln, 2015.

## Materialkombinationen für das System Laufrad/Laufschiene

Netzplan-Nr.: A39510270004

Projektleiterin: Dipl.-Ing. U. Gabrys, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

E-Mail: ulrike.gabrys@baw.de

### 1 Problemdarstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Auf Grund von vermehrt auftretenden Schäden an Laufrädern (Gegenkörper) oder Laufschienen (Grundkörper) an Verschlüssen des Stahlwasserbaus sollte das Rad-Schiene-System im Stahlwasserbau hinsichtlich vorteilhafter Materialkombinationen intensiv untersucht werden (Bild 1). In den geplanten Versuchen sind unterschiedliche, marktübliche, kostengünstige Materialkombinationen (maximal drei) mit verschiedenen Parametern wie z. B. Korrosionsbeständigkeit, Härte, Härteunterschiede und Verschleißfestigkeit zu untersuchen. Ziel ist es, ein am Markt verfügbares Rad-Schiene-System zu finden, dass unter den üblichen rauen Bedingungen für Stahlwasserbauten eine lange Nutzungsdauer aufweist und universell eingesetzt werden kann.

Zurzeit werden die unterschiedlichsten Materialkombinationen, wie z. B. unlegierte Stähle mit Schienestählen oder nichtrostende Stähle mit unlegierten Stählen, für das Rad-Schiene-System eingesetzt. In den letzten Jahren wurden bevorzugt die Auftragsgeschweißten Rollen bzw. Schienen eingebaut. Aber auch verschiedene nichtrostende Stähle, Stahlguss oder unlegierte Stähle sind zum Einsatz gekommen.

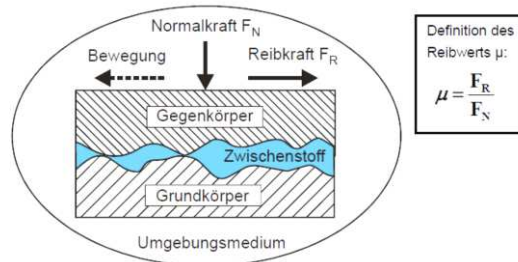


Bild 1: Beispielzeichnung für das Modell eines Tribologischen Systems, Durst (2008)

Bei den Auftragsgeschweißten Rädern bzw. Schienen sind die Formeln der Hertzschen Pressung, wie sie in der DIN 19704 publiziert sind, nicht anwendbar, da die Auswirkungen der Pressungen in der Übergangsschicht nicht bekannt sind. Auch liegen wenige oder keine Untersuchungen über das Zusammenwirken der unterschiedlichsten Stähle in mit Schwebstoffen angereicherten Wässern vor. Hohe Drücke zwischen verschiedenen Materialien einhergehend mit im Wasser befindlichen Schwebstoffen können Schäden infolge Adhäsion, Abrasion, Korrosion oder Pitting hervorrufen. Zurzeit sind zwei Fragestellungen zu beantworten:

- Welche Materialien und welche Schichtdicken sind bei Auftragsgeschweißten Rädern bzw. Schienen erforderlich (anzuwenden)?
- Welche Materialien mit speziellen Oberflächenbehandlungsverfahren sind zum Einsatz als Rad-Schiene-System ebenfalls geeignet?

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Auf Grund der unterschiedlichsten Materialkombinationen sind in den letzten Jahren vermehrt Schäden durch elektrolytische Korrosion oder Abrasion an den Rädern oder Schienen aufgetreten. Um der WSV eine oder mehrere geeignete Systeme anbieten zu können, sind umfangreiche Versuche zur Beurteilung des tribologischen Systems erforderlich. Des Weiteren sollen Formeln zum Nachweis der Hertzschen Pressungen an Auftragsgeschweißten Rädern bzw. Schienen formuliert werden, die sicherstellen, dass es auf Grund der Pressung zu keiner Ablösung der Auftragsschweißung kommt. Das Maximum der Pressung liegt einige Millimeter unter der Oberfläche. Mit den zu entwickelnden

Formeln zum Nachweis der Hertzschen Pressung soll sichergestellt werden, dass dieses Maximum nicht in der Übergangszone zwischen Grundmaterial und Auftragsschweißung liegt. Somit wird zukünftig Planungssicherheit hinsichtlich des aufzuschweißenden Materials und der Dicke der Auftragschweißung erreicht. Diese Angaben können auch Eingang in die DIN 19704-1 Stahlwasserbauten, Teil 1 - Berechnungsgrundlagen (2014) finden.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Standardisierung von möglichen, durch Versuche abgesicherten Materialkombinationen und deren tragsicherheitsrelevanten Nachweise (z. B. Hertz'sche Pressung).

## **2 Untersuchungsmethoden**

Tribologische Untersuchungen (unter Wasser, mit hohen Drücken und den im Stahlwasserbau üblichen Überrollungen) sollen an maximal drei unterschiedlichen Materialkombinationen durchgeführt werden. Die Materialkombinationen sind auf Grundlage einer Literaturrecherche und in Absprache mit den Neubauämtern der WSV noch festzulegen.

## **3 Ergebnisse**

Die Recherche nach geeigneten Prüfinstituten ist abgeschlossen. Die Festlegung der Materialkombinationen ist weitestgehend abgeschlossen. Es liegen jedoch noch keine Versuchsergebnisse vor. In 2015 konnten aus terminlichen Zwängen und vorher nicht absehbaren zusätzlichen Aufgaben keine Leistungen erbracht werden.

## **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016: Festlegung des Versuchsumfanges, Ausschreibung und Vergabe der Versuche, Beginn der tribologischen Versuche an einem System.

2017: Fortführung der tribologischen Versuche an zwei weiteren Laufrad-/Laufschiene-Systemen

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2017 (beantragt).

## **5 Literatur**

Durst, O. (2008): Korrosions- und Verschleißigenschaften neuartiger, kohlenstoffhaltiger PVD-Schichten. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Institut für Werkstoffkunde.

## **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Einfluss von Korrosion auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlwasserbaukonstruktionen**

**Netzplan-Nr.:** A39510270005

**Projektleiter:** Dipl.-Ing T. Hesse, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

**E-Mail:** thomas.hesse@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In den aktuell gültigen Bemessungsregeln für den Stahlbau (Eurocode) ist ein negativer Einfluss von Korrosion auf die Ermüdungsfestigkeit nicht berücksichtigt. Stahlwasserbauteile sind ihrer Bestimmung entsprechend, im Normalfall, einer permanenten Belastung durch Süß- oder Seewasser ausgesetzt. Die praktische Erfahrung zeigt, dass bei Stahlwasserbauteilen der Korrosionsschutz nicht über die gesamte Lebensdauer in einem einwandfreien Zustand ist, sondern dass es insbesondere im Bereich von Kanten, Ecken, Anschlüssen und Schweißdetails zu Korrosionsschäden kommt.

Es stellt sich daher die Frage, ob eine Überprüfung der Ermüdungsfestigkeit nach Eurocode für Stahlwasserbaukonstruktionen ausreichend ist, oder ob durch Korrosionseinfluss die Ermüdungsfestigkeiten so weit reduziert werden, dass sich daraus eine signifikante Verringerung der ertragbaren Lastspielzahlen ergibt.

Recherchen zum bereits vorliegenden Wissen zu diesem Thema haben ergeben, dass eine negative Beeinflussung der Ermüdungsfestigkeit durch Korrosion zu vermuten ist. Gesicherte Erkenntnisse, insbesondere zur genauen Größe der Beeinflussung, liegen aber noch nicht vor.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Bereich der WSV gibt es zahlreiche ermüdungsbeanspruchte Stahlwasserbaukonstruktionen (Schleusentore), die sich dauerhaft im Wasser bzw. im Wasserwechselbereich befinden. Daher ist es notwendig, zu überprüfen, ob die Bemessung auf Ermüdungsfestigkeit nach Eurocode für den Spezialbereich Stahlwasserbau in jedem Fall zutreffend und ausreichend sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Projektziel ist die Ermittlung der Reduktionsraten der Ermüdungsfestigkeit infolge Korrosion für verschiedene Randbedingungen. Weiterhin soll überprüft werden, ob trotz Verminderung der Ermüdungsfestigkeit infolge Korrosion die für den entsprechenden Kerbfall maßgebenden Wöhlerlinien nach Eurocode 3 erreicht werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

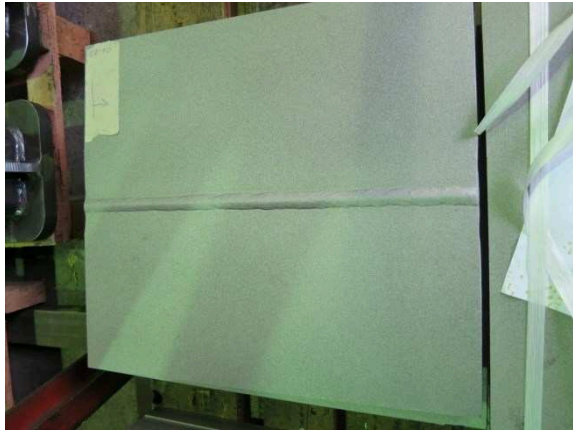
Die Ermüdungsfestigkeit durch Korrosion geschädigter Probekörper soll durch Schwingversuche verifiziert werden. Die entsprechenden Probekörper werden aus Blechen gewonnen, die über einen Zeitraum von zwei Jahren unter für den Stahlwasserbau üblichen Umgebungsbedingungen (ungünstigster Fall: Wasserwechselbereich) gelagert werden.

### **3 Ergebnisse**

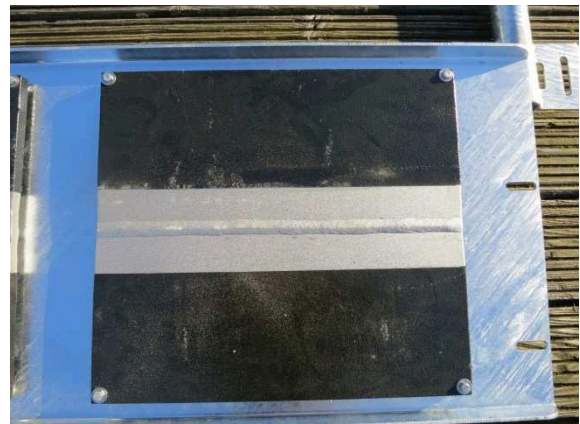
Die Projektplanung und -vorbereitung wurde im Mai/Juni 2013 durchgeführt. Für die Herstellung der Prüfbleche und für die Durchführung der Schwingversuche wurden Spezifikationen erstellt, die die Grundlage für die Vergabe dieser Leistungen bilden.

Als Auslagerungsstandort Meerwasser wurde der bestehende BAW-Auslagerungsstand in Kiel ausgewählt. Dieser befindet sich im Zuständigkeitsbereich des WSA Lübeck, Außenbezirk Kiel. Als Auslagerungsstandort Süßwasser wurde ein schwimmender Schiffsanleger im Rheinhafen Karlsruhe ausgewählt. Der Eigentümer des Anlegers, die Karlsruher Versorgungs- Verkehrs- und Hafen GmbH, erteilte seine Zustimmung und unterstützt das Projekt.

Für die Vergabe der Stahlbauarbeiten und der Schwingversuche wurden entsprechende Vergabeverfahren durchgeführt. Die Stahlbauarbeiten wurden im Juni 2013 an ein Karlsruher Stahlbauunternehmen vergeben. Nachdem die Fertigung Anfang November 2013 abgeschlossen war, wurden die Prüfbleche im November/ Dezember 2013 ausgelagert.



*Bilder 1 und 2: Prüfbleche nach den Sandstrahlen*



*Bilder 3 bis 6: Prüfbleche für Binnenauslagerung auf Befestigungsstruktur montiert*

Die Schwingversuche wurden im September 2013 an das KIT Stahl- und Leichtbau, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine in Karlsruhe vergeben.

Ab Anfang 2014 befanden sich die Prüfbleche unter Bewitterung. Im Jahr 2015 wurde sowohl am Binnen- als auch am Seestandort eine Zwischenbegutachtung der Prüfbleche durchgeführt.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Januar - März 2016: Bergung der Prüfbleche

Mai - Dezember 2016: Durchführung der Schwingversuche und Auswertung

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2016.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Korrosionsschutzuntersuchungen – Vergleich Naturauslagerung zu Labor**

**Netzplan-Nr.:** A39510270006

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. G. Binder, Abteilung Bautechnik,  
Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

**E-Mail:** guenter.binder@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zur Einschätzung bzw. Evaluierung von Labortestverfahren für den Korrosionsschutz müssen diese mit Langzeitauslagerungen in der Natur vergleichbar sein. Diese Fragestellung beschäftigt seit langem auch die internationale Normung, wobei immer noch verlässliche Daten fehlen. Von den beiden Prüfarten können jedoch die Resultate wiederum nur dann sinnvoll verglichen werden, wenn Unterschiede in der Applikation der einzelnen Schutzsysteme ausgeschaltet werden. Bei diesem Vorhaben sollen deshalb erstmals beide Prüfplattenserien in denselben Beschichtungsvorgängen hergestellt und anschließend in der Natur und im Labor geprüft werden.

Korrosionsschutzbeschichtungen für Stahlwasserbauten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) werden grundsätzlich nach Labortestverfahren der Richtlinien zur Prüfung von Beschichtungstoffen (RPB) geprüft und zugelassen. Den Laboruntersuchungen folgt noch ein Naturauslagerungstest, u. a. um die Laborergebnisse zu verifizieren. Die Testdauer beträgt hierbei fünf Jahre.

Bei den bisher angestellten Vergleichen zwischen Labor- und Naturauslagerungsversuchen (z.B. in Binder(2008)) zeigte sich eine gewisse Gleichsinnigkeit der Unterrostungstendenz. Allerdings ist die stat. Auswertung durch die beiden Extremwerte der Unterrostungen – mit und ohne Zink in der Grundbeschichtung – geprägt. Üblicherweise werden die Prüfplatten für die Langzeitauslagerung in der Natur (LZA, s. BAW(2013)) und für die Laborprüfung getrennt hergestellt. Die Notwendigkeit dieser Untersuchungen, neben dem grundsätzlichen Vergleich Labor zur Natur, ist nämlich auch dadurch gegeben, dass es wohl große Applikationseinflüsse beim Herstellen von beschichteten Prüfplatten gibt, wie sie zuletzt bei Korrosionsschutzprüfungen aufgefallen sind, Heins (2014).

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Für die Bauwerke der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) müssen Korrosionsschutzstoffe für den Bauwerkserhalt bereitgestellt werden. Es ist zunächst zu prüfen, ob die Laborverfahren die Kriterien für brauchbare Schutzsysteme in ausreichender Differenzierung erfüllen. Im Detail ist zu prüfen, ob weitere bzw. neue Kriterien, die als typische Belastungen von Stahlwasserbauten in Betracht kommen, getestet werden müssten. Diese beinhalten z.B. die Belastung von Stahlwasserbauteilen durch Schlag und Stoß, welche bisher in keinem Regelwerk konsequent umgesetzt worden ist. Darüber hinaus müssen sich die Labortestverfahren an der Wirklichkeit messen. Hierzu dient u.a. der Vergleich von Laborergebnissen mit jenen der Langzeitauslagerungen in der Natur unter Ausschluss von Präparationseinflüssen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen ist es, einen Vergleich der Labortests mit praxisnahen Belastungen der Natur zu ermöglichen. Es ist vorgesehen, beschichtete Prüfplatten mit definierten Schutzsystemen verschiedener Hersteller mit jeweils identischer Applikation sowohl für die Langzeitauslagerung in der Natur wie auch für Kurzzeittests im Labor zu verwenden. Als ein relativ objektives Bemessungskriterium für die Schutzwirkung kann die Unterrostung an einer künstlichen Verletzung herangezogen werden. Da bei allen relevanten bisherigen Testverfahren die Unterrostung an der spezifischen künstlichen Verletzung (Riss bzw. Frässchnitt) maßgeblich ist, ist zu prüfen, inwieweit noch praxisrelevantere Verletzungen, wie z. B. Stoß (s. Transport- oder Einbauschäden von Bauteilen), gefunden werden können. Neben der Vergleichbarkeit von Labor- und Naturauslagerungs-Verfahren ist es Ziel dieser Untersuchungen, den „Beschleunigungsfaktor“ der verschiedenen Laborsimulationen gegenüber den Naturauslagerungen zu berechnen.



## 2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen stützen sich auf unterschiedliche Vorgehensweisen, d. h. sowohl auf Labor- wie auch auf Naturlagerungsversuche. Das Hauptkriterium ist die jeweilige Unterrostungstiefe an den künstlichen Verletzungen (2 mm-Fräschnitt). Daneben sollen noch Unterrostungsprüfungen an den Versuchsblechen mit neuartiger künstlicher Verletzung, durch eine Schlagverletzung (Impact, z.B. DIN EN ISO 6272) durchgeführt werden. Diese erfolgt mit einem fallenden Gewicht und simuliert möglicherweise die Wirklichkeit von Schlagbeanspruchungen (Schiffstouchierung, Torausbau, mechanische Arbeiten am Verschlussorgan, Transportschäden) besser als ein Fräschnitt. Die Ergebnisse der Unterrostungen sollen statistisch ausgewertet werden um evtl. existierende Korrelationen zwischen den Testreihen zu ermitteln.

## 3 Ergebnisse

Nach neueren Erkenntnissen kann man davon ausgehen, dass die Applikation der Beschichtungsstoffe großen Einfluss auf das Untersuchungsergebnis der Labortestbelastung hat, [Heins(2014)]. Deshalb werden im Forschungsvorhaben Prüfplatten, welche in einem Applikationsabschnitt hergestellt worden sind, nach Labor- und Feldtestverfahren verglichen. Nach den RPB, BAW(2011), entsteht dadurch eine deutliche Selektion, da z.B. Zinkstaub-freie Systeme im Feldtest deutlich schlechter abschneiden als in den genormten Labortestverfahren, BAW(2011).

In weiterführenden Untersuchungen wurden Schlagtest auf beschichteten Prüfplatten durchgeführt (s. Arbeitsplan in Tab. 1), die darüber Auskunft geben sollten, wie Beschichtungssysteme nach mechanischen Verletzungen durch Schlag und Stoß noch einen nennenswerten Beitrag zum Korrosionsschutz des Substrats leisten können. Dieser Ansatz erscheint dem Verfasser realistischer als die künstliche Verletzung durch einen Fräschnitt. Die hieraus resultierenden Fehler bzw. Unterrostungen wurden visuell mit el. Durchschlagsprüfung und Ausmessung der unterrosteten Fläche vor und nach der Salzsprühnebelbelastung ermittelt. Die Untersuchungsergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Systeme mit Zinkstaub-Grundierung zeigen tendenziell geringere Unterrostung als andere Systeme
- wird die Zinkstaubgrundierung mit 1-komponentigem PUR kombiniert, so wird die Unterrostung nach der Schlagbeanspruchung noch weiter verringert (Berücksichtigung der Vorder- und Rückseite).

In Bild 1 sind die Ergebnisse des Schlagtestes und Salzsprühnebelbelastung der jeweiligen Vorderseite der beschichteten Prüfbleche aufgezeigt (Zn/PUR: Pr.-Nr. 8 und 25).

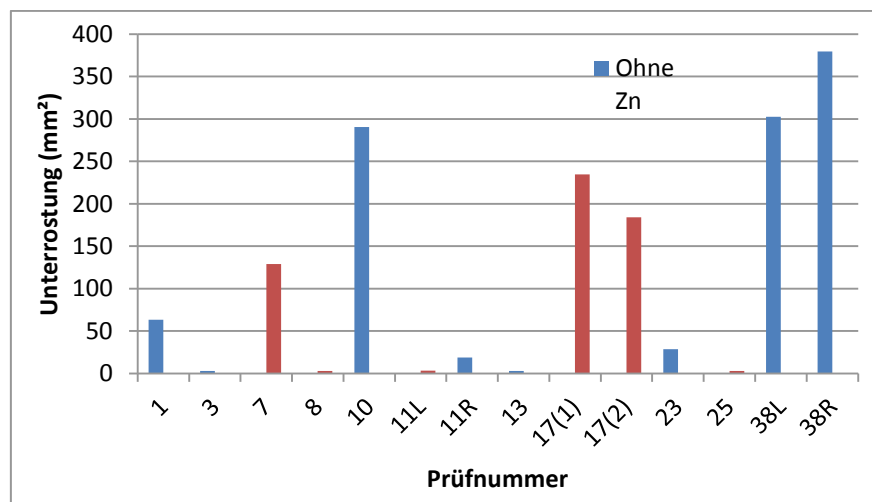


Bild 1: Unterrostung an der Vorderseite des Stahlsubstrats



#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Nach der Prüftafelpräparation konnte mit den Laboruntersuchungen bereits Ende 2014 begonnen werden (s. Tab. 1). Hierbei wurden zunächst sechs von 30 Systemen geprüft. Bis die eigentlichen Vergleichsplatten der LZA-Versuchsserie 2013 bis 2018 zur Verfügung stehen, können weitere Laborversuche, z.B. mit DIN EN ISO 9227 (Salzsprühnebel) und auch ISO 20340 (Zyklustest mit Salzsprühnebel) durchgeführt werden und mit den Resultaten der LZA-Kiel und begrenzt auch Windheim (Weser) verglichen werden. Zunächst wird jedoch mit einer Variante der Unterrostung - nach Schlagverletzung statt Frässchnitt – die Untersuchung weitergeführt. Ebenfalls in Tabelle 1 sind die geplanten Untersuchungen beschrieben!

<b>Prüfverfahren</b>	<b>Start / Ende</b>	<b>Arbeiten</b>	<b>Anmerkung</b>
Langzeitauslagerung	2013 / 2018	Auslagerungsserie 2013 bis 2018	Drei Lokalitäten mit LZA- und Laborprüfplatten
Salzsprühnebeltest DIN EN ISO 9227	2014 / 2015	Prüfplattenvorbereitung, Belastung und Auswertung	Auslagerungsserie 2008 bis 2013; Restplatten
Zyklustest – aging test ISO 20340	2015 / 2016	Prüfplattenvorbereitung, Belastung und Auswertung	Auslagerungsserie 2008 bis 2013; Restplatten
Schlagprüfung DIN EN ISO 6272	Mitte 2015 / 2016	Prüfplattenvorbereitung, Belastung und Auswertung	Unterrostungsmessung nach zusätzlicher Salzbelastung

*Tabelle 1: Versuchsbeispiele für Unterrostungstestverfahren nach verschiedenen Belastungen*

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2018.

#### 5 Literatur

- Binder, G. (2008): Determine usable coating systems – results of laboratory tests versus long term trials in nature; NACE corrosion 2008, New Orleans, paper 08001 (2008) 1-15
- BAW (2013) Langzeitauslagerungsversuche von Beschichtungssystemen für den Stahlwasserbau 2008 bis 2013 (Netzplan-Nr.: A39510210413), Karlsruhe 2015
- Heins, O. (2014): Auswahl von Beschichtungsstoffen für OWEA; workshop des FA KOR der HTG, Hamburg Oktober 2014 (Tagungsband)
- BAW (2011): Richtlinie zur Prüfung von Beschichtungssystemen für den Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (RPB), BAW, Ausgabe 2011.

#### 6 Veröffentlichungen

- Binder, G. (2015): Zulassungs- und Eignungsprüfungen von Beschichtungsstoffen – Vergleich Labor/Natur; Vortrag bei der Fachtagung Bundesverband Korrosionsschutz, Köln 2015
- Binder, G. (2016): Corrosion protection in maritime environments – assessing the excellence of good and average systems, PCE, in print.

## **Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis der Tragfähigkeit von Schlauchwehrrmembranen**

**Netzplan-Nr.:** A39510270007

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. R. Gurt, Abteilung: Bautechnik, Referat Stahlbau, Korrosionsschutz (B2)

**E-Mail:** ralf.gurt@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Wurden in der Vergangenheit ausschließlich Wehrverschlüsse aus Stahl eingesetzt, stellt sich das Schlauchwehr unter bestimmten Randbedingungen als Alternative dar. Ferner zeichnet sich ab, dass auch dieser Verschlusstyp als ein Standard für künftige Neubaumaßnahmen von Wehranlagen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung festgelegt wird.

Bislang gibt es weltweit keine einheitliche Methodik bei der Bemessung von Schlauchmembranen oder Normen, in denen das Sicherheitsniveau (z. B. Sicherheitsbeiwerte, Degradationsfaktoren) festgelegt wird. Eine Ausnahme ist Japan, wo es eine Richtlinie zur Planung von Schlauchwehren gibt, ohne dabei im Detail auf die Bemessung einzugehen. Daneben berichten nur Van der Horst & Rövekamp (2001) über die Bemessung des Sturmflutwehres Ramspol in den Niederlanden. In Deutschland existiert kein einheitliches Bemessungskonzept für Schlauchwehre. Eine Zustimmung im Einzelfall wäre für jeden Neubau erforderlich. Dies hätte unterschiedliche Sicherheitsniveaus zur Folge.

Die zur Anwendung kommenden Schlauchwehrrmembranen weisen ein nichtlineares anisotropes Materialverhalten auf. In der statischen Berechnung wird stark vereinfacht ein linear-elastisches Materialverhalten angenommen, welches je nach Wahl der Steifigkeitsparameter einen großen Einfluss auf die ermittelte Beanspruchung haben kann. Daher ist die Ermittlung der fiktiven elastischen Materialeigenschaften der für die Verwendung von Schlauchwehren geeigneten Membranen erforderlich.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung wird zukünftig alte Wehranlagen durch neue ersetzen müssen. Dabei wird es auch zur Planung und Ausführung von Schlauchwehren kommen (z. B. Wehr Beihingen, Wehr Obernau). Um ein ausreichendes und einheitliches Sicherheitsniveau an den Anlagen der WSV zu erhalten und die Planungs- und Genehmigungsverfahren zu vereinfachen, ist das Vorhandensein eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis der Tragfähigkeit von Schlauchwehrrmembranen und die Kenntnis deren Steifigkeitsparameter von großer Bedeutung.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Vorhabens ist es, für die zur Anwendung geeigneten Membranen die Steifigkeitsparameter zu ermitteln, mit denen eine möglichst realitätsnahe Beanspruchung ermittelt werden kann. Anschließend soll ein eurocodekonformes Bemessungskonzept für Schlauchwehrrmembranen entwickelt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Durch Materialversuche sind Kraft-Verformungskurven zu ermitteln, die als Grundlage für die Bestimmung der Steifigkeitsparameter dienen. Diese Materialeigenschaften werden durch Zug- und Druckversuche ermittelt und gegebenenfalls durch biaxiale Zugversuche ergänzt werden. Anschließend werden numerische Simulationen der Beanspruchungszustände von Schlauchmembranen mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode durchgeführt. Hierzu kommen kommerzielle Softwares zum Einsatz. Materialgesetze, Belastungen und Kontakteigenschaften werden hier für die Berechnung hinterlegt. Relevante Spannungen werden ausgewertet und zur Bestimmung von Spannungskonzentrationen verwendet. Bereits bestehende Untersuchungen (Abteilung W (Gebhardt, 2006), etc.) werden dabei berücksichtigt. Naturmessungen können (zur Verifizierung einzelner Ergebnisse) gegebenenfalls herangezogen werden.

### 3 Ergebnisse

Die analytischen Ergebnisse der Membrankraft in Umfangsrichtung aus (Gebhardt, 2006) können mit der FE-Lösung bestätigt werden. Dabei sind die Materialparameter und die Querschnittswerte von untergeordneter Rolle.

Der Aufbau des FE-Modells mit Schalenelemente führt zu einer Spannungserhöhung im Bereich der Auflager und Falten. Diese Spannungen hängen sehr von Materialparametern und Querschnittswerten ab, siehe auch (Gurt, 2013).

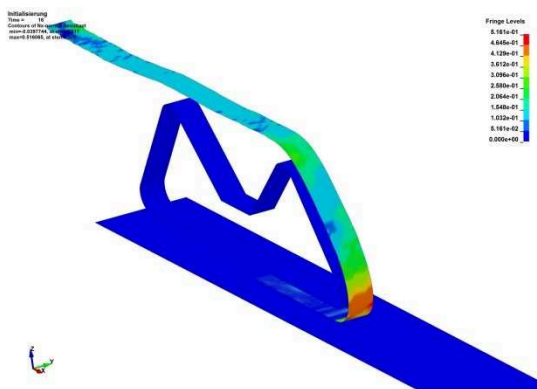
Die Bestimmung von Materialkennwerten aus einem einfachen Zugversuch ist hinreichend genau für Ausschnitte, in denen ein Membranzustand herrscht, beispielsweise auf dem Schlauchwehr in Feldmitte. An diesen Stellen liegt ein reiner Membranzustand vor, die Modellierung mit Schalen- oder Membranelementen führt zu demselben Ergebnis. In anderen Bereichen, besonders in der Nähe der Auflagerbedingungen und der Falten ist die Modellierung von großer Bedeutung.

Die Schlauchmembrane besteht aus elastomerbeschichteten Geweben. Die Gewebeeinlagen, aus Polyester oder Polyamid bestehend, können nur auf Zug belastet werden. Der Beschichtungsstoff (EPDM, ...) ist zugschlaff und dient nur zum Schutz der Gewebeeinlagen und zum Abdichten des Schlauchvolumens. Die Inkompressibilität der Elastomere ( $\nu \approx 0,5$ ) führt zur Aufnahme von Druck in den Deckschichten. Somit kann sich im Falten- und Auflagerbereich ein Kräftepaar zwischen den beiden Materialien ausbilden, ähnlich des Stahlbetons.

Daher ist es wichtig, diese Bereiche bei der Modellierung ausreichend genau abzubilden. Hierzu gehört die Unterscheidung zwischen Gewebe- und Gummilagen.

Druckversuche mit Elastomerproben zeigen, dass die Drucksteifigkeit deutlich über der Zugsteifigkeit liegt. Vergleiche zu numerischen Druckversuchen bestätigen die gewonnenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen.

Die äußere Deckschicht ist deutlich dicker, was zu einer Erhöhung des inneren Hebelarms führt. Im Bereich der Auflager liegt diese Deckschicht im Druckbereich, was große Spannungskonzentrationen in diesem Bereich zur Folge hat. In Bild 1 ist eine solche Spannungserhöhung in Rot zu erkennen, dunkelblaue Bereiche sind hierbei spannungsfrei.



**Bild 1:** Detailmodell Auflagerschiene – Membranstreifen um die Schiene mit gewählter Umfangsspannung gezogen – höchste Spannung in Rot, keine Spannung in Dunkelblau

Für die Spannungsspitze ist neben der Lage der Gewebeschichten auch die Modellierung von Bedeutung. Daher ist der Aufbau als Verbundwerkstoff mit mehreren Elementlagen das Mittel der Wahl. Aufgrund der höheren Zugsteifigkeit der Gewebe gegenüber dem Elastomer würde sich eine entsprechend hohe Biegespannung in dem Gewebe einstellen. In Abhängigkeit mit den realen Bedingungen der Gewebe können diese aber nicht aufgenommen werden, weshalb hier die Modellierung mit Membrantheorie zum Einsatz kommt. Bei dem Elastomer wird weiterhin die Schalentheorie verwendet.

Entsprechend angepasste Materialmodelle für Gewebewerkstoffe und Elastomere mit einstellbaren Spannungs-Dehnungs-Verhalten heben die Qualität auf ein neues Niveau.

Untersuchungen zur Alterung der Gewebe zeigen eine Abnahme der Festigkeit. Hierzu wurden Materialproben beim Einbau ausgelagert und 2015 erneut mit Zugversuchen geprüft.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016: Aufstellung maßgebender Lastfälle, Parameterstudie für ausgewählte Wehrgeometrien und Steifigkeitsparameter mit Bestimmung von Spannungen und Spannungskonzentrationsfaktoren, Bestimmung von Degradationsfaktoren, Aufstellung eines Bemessungskonzeptes

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2017.

#### **5 Literatur**

- Van der Horst, A.Q.C., Rövecamp, N.H. (2001): Design of the Storm Surge Barrier Ramspol, The Netherlands. The Netherlands. HTC Congress
- Gebhardt, M. (2006): Hydraulische und statische Bemessung von Schlauchwehren. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung - Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik. Dissertation.
- Gurt, R. (2013): Untersuchungen zur Spannungskonzentration und Faltenbildung bei Schlauchwehren mit Hilfe nichtlinearer FEM-Analysen. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mechanik. Diplomarbeit.

#### **6 Veröffentlichungen**

- Gurt, R.; Deutscher, M.; Gebhardt, M. (2015): Design and Analysis of Reinforced Rubber Membranes for Inflatable Dams. In: Onate, E.; Bletzinger, K.-U.; Kröplin, B. (Hrsg.): Structural Membranes 2015 : VII International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures. Barcelona, 2015, S. 306–317
- Maisner, M., Möschen, M., Becker, H., Gebhardt, M., Deutscher, M., Gurt, R. (2015): Use of rubber conveyor belt materials at navigable waterway constructions, In "International Rubber Conference 2015", 29. Juni-2. Juli 2015, Nürnberg.

## **Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe**

**Netzplan-Nr.:** A39510308099

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. A. Westendarp, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** andreas.westendarp@baw.de

## **1 Problemstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei Mörteln und Betonen gemäß DIN 1045 und ZTV-W LB 215 geht man davon aus, dass bei Wahl bestimmter Betonausgangsstoffe und Einhaltung bestimmter Grenzwerte bei der Betonzusammensetzung mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ein Beton mit hohem Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand erzielt wird (design concept). Angesichts der rasanten technischen Entwicklung auf dem Baustoffsektor, eines grenzüberschreitenden europäischen Marktes und einer im Verkehrswasserbau im Vergleich zu Betonbauwerken nach DIN 1045 auf bis zu 100 Jahre verlängerten Nutzungsdauer wird es zunehmend erforderlich, dieses auf langjährigen Erfahrungen mit bestimmten Baustoffen und Bauverfahren basierende Konzept durch eine direkte Prüfung des Frostwiderstandes des Betons (performance concept) zu ergänzen bzw. zu ersetzen. Weder im Verkehrswasserbau noch in anderen Baubereichen sind bislang (mit Ausnahme der ZTV-W LB 215 und 219) auf nationaler Ebene die für die Anwendung des performance concept notwendigen Frostprüfverfahren und Abnahmekriterien festgelegt worden. Von maßgeblicher Bedeutung für die Intensität eines Frostangriffes auf Beton und damit auch für Prüfverfahren und Abnahmekriterien sind die Temperaturbeanspruchung und der Wassersättigungsgrad des jeweiligen Betons. Über die Größenordnung beider Parameter im Bauwerk lagen kaum Informationen vor.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Verkehrswasserbauwerke unterliegen aufgrund spezifischer Randbedingungen (direkte Beaufschlagung mit Süß- bzw. Meerwasser in Verbindung mit einer großen Anzahl von Frost-Tau-Wechseln infolge betriebs- und/oder gezeitenbedingter Wasserstandsänderungen) einer besonders intensiven Frostbeanspruchung. Gleichzeitig müssen, zumindest bei massigen Betonbauteilen wie beispielsweise Schleusenammerwänden, aufgrund der Hydratationswärmeproblematik Betonzusammensetzungen gewählt werden, die hinsichtlich der Dauerhaftigkeit im Grenzbereich einzuordnen sind. Der Risikominimierung (zielsichere Vermeidung von Betonen mit unzureichendem Frostwiderstand) kommt im Verkehrswasserbau angesichts der eingesetzten Betonkubaturen und der eingeschränkten Möglichkeiten einer ggf. erforderlichen Betoninstandsetzung aufgrund unzureichenden Frostwiderstands des Betons eine erhebliche Bedeutung zu.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden im Wesentlichen folgende Ziele verfolgt:

Festlegung bzw. Verifizierung wasserbauspezifischer Frostprüfverfahren und Abnahmekriterien, Beantwortung verschiedener wasserbauspezifischer Grundsatzfragen zum Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe (insbesondere tatsächliche Temperaturbeanspruchung und tatsächlicher Sättigungsgrad des Betons von Wasserbauwerken).

## **2 Untersuchungsmethoden**

Das Forschungsvorhaben ist in drei parallel zu bearbeitende Teile gegliedert:

Teil I:

Untersuchung von Betonen aus bestehenden Bauwerken sowie Auslagerung und Untersuchung von gesondert hergestellten Betonen zur Ermittlung von Materialkennwerten, zur Beurteilung des Zusammenhanges zwischen Laborprüfung und Bauwerksverhalten und zur Verifizierung der Frostprüfung gemäß ZTV-W LB 219 (heute: BAW Merkblatt „Frostprüfung von Beton“).

Teil II:

Ermittlung der tatsächlichen Temperaturbeanspruchung und des Wassersättigungsgrades im Beton von Verkehrswasserbauwerken. Im Hinblick auf die tatsächliche Temperaturbeanspruchung wurden u. a. die bei der Begutachtung der Schleusenanlage Eckersmühlen gewonnenen Ergebnisse ausgewertet. Zur Bestimmung des sich tatsächlich in der Betonrandzone von Verkehrswasserbauwerken in verschiedenen Tiefenhorizonten einstellenden Feuchtigkeitsgehaltes werden gemeinsam mit der RWTH Aachen Untersuchungen an zwei neu errichteten und an einem bestehenden Bauwerk durchgeführt. Als Messeinrichtungen wurden Temperaturfühler und Multi-Ring-Elektroden (MRE) in den Beton eingebaut.

Teil III:

Unterstützung der Aktivitäten der Arbeitsgruppe "Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse" des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb).

### 3 Ergebnisse

Teil I:

Aus verschiedenen Schleusen am Main-Donau-Kanal und an der Mosel sind Bohrkern entnommen worden, die in der BAW untersucht wurden. In 2001 und 2002 sind in der BAW umfangreiche Untersuchungen an gesondert hergestellten, verkehrswasserbautypischen Betonen sowie an Betonen nach EN 206 durchgeführt worden. In den Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein wurden in 2003 gemeinsam mit der RWTH Aachen und der Fa. CEMEX Betonprobekörper ausgelagert, welche unter Verwendung von CEM III/A hergestellt worden sind. Der Abschlussbericht wird derzeit fertiggestellt. Die restlichen ausgelagerten Prüfkörper bleiben bis auf weiteres im Sparbecken ausgelagert. In 2009 wurde im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ein Fertigteil aus dem Projekt Instandsetzung Schleusen Üfingen/Wedtlenstedt ausgelagert, welches nach Laboruntersuchungen einen unzureichenden Frostwiderstand aufweist. Möglichen Schadensursachen wurde im Rahmen von Grundsatzuntersuchungen nachgegangen und die Ergebnisse im Juli 2010 in einem Bericht zusammengefasst. An dem ausgelagerten Fertigteil werden Grundsatzuntersuchungen zum Verhalten des Betons unter Praxisbedingungen durchgeführt.

Teil II:

Die Temperaturmessungen an der Schleusenanlage Eckersmühlen sind ausgewertet und veröffentlicht worden. Messaufnehmer für die Bestimmung von Temperaturen und Feuchtigkeitsgehalten wurden in einer Kammerwand der Doppelschleuse Hohenwarthe sowie in verschiedenen Sparbeckenwänden der Schleuse Hilpoltstein installiert. Danach sind jahreszeitliche Schwankungen des Sättigungsgrades in den Expositionen unter mäßiger Sättigung (XF1) wesentlich stärker ausgeprägt als unter hoher Sättigung (XF3). Hohe Sättigungsgrade treten in der Expositionsklasse XF1 als seltene Spitzenwerte auf, an die sich in der Regel eine Trocknungsphase anschließt. Bei Bauteilen mit ständigem oder periodischem Wasserkontakt wie beispielsweise Schleusen lag der Sättigungsgrad des Randbereiches in der Wasserwechselzone hingegen weitgehend konstant und entsprach etwa der betonspezifischen Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck. Derart hohe Wassersättigungsgrade in Verbindung mit ausgeprägten Temperaturänderungen infolge betriebsbedingter Wasserstandsänderungen führen bei Verkehrswasserbauwerken zu Frostbeanspruchungen, die für deutsche Gegebenheiten dem pessimalen Bereich zuzuordnen sind. Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer Dissertation verarbeitet.

Zur Erweiterung der Datenbasis wurde die Schleuse Kersdorf während der Bauphase mit dem gleichen Messsystem wie die Schleusen Hohenwarthe und Hilpoltstein ausgerüstet. Die Schleuse ging 2013 in Betrieb und liefert erste Messdaten unter Betriebsbedingungen. Derzeit erfolgt die Kalibrierung.

Zur Erfassung einer XF3-Beanspruchung an horizontalen Flächen wurde in 2012 eine Betonplatte hergestellt und analog zu den Bauwerksmessungen mit Temperatursensoren und MRE ausgestattet. Bislang wurden Daten über zwei Winter auf dem Gelände der BAW aufgezeichnet. Die Kalibrierung ist weitgehend abgeschlossen und die Platte wird an der Schleuse Hilpoltstein ausgelagert.

Teil III:

Die bisher vorliegenden Ergebnisse des Forschungsvorhabens haben unmittelbaren Eingang in die Arbeit der Arbeitsgruppe "Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse" des DAfStb gefunden. Die BAW und der DAfStb haben der Universität Karlsruhe den Auftrag zur Erstellung des Abschlussberichtes der o. g. DAfStb-Arbeitsgruppe erteilt. Dieser Abschlussbericht wurde in 2009 fertig gestellt und in 2010 als DAfStb-Heft 577 publiziert.

Teile I bis III:

Die Ergebnisse und Erkenntnisse des Forschungsvorhabens sind auch in die Erarbeitung des BAW-Merkblattes "Frostprüfung von Beton" eingeflossen, welches zum 01.01.2005 in den Geschäftsbereich der WSV eingeführt worden ist, und für den Neubaubereich (ZTV-W LB 215 (Ausgabe 2012)) und für die Betoninstandsetzung (ZTV-W LB 219 (Ausgabe 2013)) in Bezug genommen wird.

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) hat bei den Frostprüfungen für seine Zulassungsuntersuchungen an Zementen und Betonen auf das CIF- bzw. CDF-Verfahren umgestellt und sich bei Vorgehensweise und Abnahmekriterien eng am BAW-Merkblatt "Frostprüfung von Beton" orientiert.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016: Erstellung des Abschlussberichtes

Laufzeit des Vorhabens: 1999 bis 2016.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

- Westendarp, A.; Schulze, M. (2000): Frostbeanspruchung von Verkehrswasserbauwerken. Beton, Band 50, Heft 5, S. 206-212
- Westendarp, A. et al. (2005): Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 560
- Westendarp, A. (2009): Wasserbauwerke unter Frostbeanspruchung. 6. Symposium "Baustoffe und Bauwerkserhaltung", Univ. Karlsruhe, 12. März 2009
- Spörel, F.; Westendarp, A.; Brameshuber, W. (2009): Frostbeanspruchung von Schleusenbauwerken. Tagungsband 17. Internationale Baustofftagung ibausil in Weimar, S. 2-735 – 2-740
- Spörel, F. (2010): Bauwerke des Wasserbaus unter Frostbeanspruchung. Frostkolloquium des DAfStb, BAW, BaSt, Berlin, 21. Januar 2010.
- Spörel, F. (2010): Bauwerksmessungen. Tagungsband, 39. Aachener Baustofftag, ibac, 25. März 2010
- Spörel, F. (2010): Dauerhaftigkeit Bauwerke: Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe. Tagungsband BAW-Kolloquium "Forschung und Entwicklung im Küstenverkehrswasserbau", Hamburg, 26./27. April 2010, S. 51-58
- Spörel, F. (2010): Frostbeanspruchung von Wasserbauwerken am Beispiel der Schleuse Hohenwarthe. VDB Regionalgruppentagung, Juli 2010, Rheinfelden
- Spörel, F. (2012): Freeze-Thaw attack on concrete structures. Proc. of the 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Karlsruhe, S. 667-672
- Spörel, F. (2013): Frostbeanspruchung und Feuchtehaushalt in Betonbauwerken. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 604
- Spörel, F.; Westendarp, A. (2015): Frostwiderstand von Beton im Verkehrswasserbau. DBV Rundschreiben 244, Ausgabe März 2015, S.10-12

## **Instandsetzungssysteme für alte Wasserbauwerke**

**Netzplan-Nr.:** A39510310127

**Projektleiter:** Dr.-Ing. T. Reschke, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** thorsten.reschke@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Für die Verkehrswasserbauwerke der WSV und hier insbesondere für die massiven Betonbauteile zeichnet sich mittelfristig ein erhöhter Instandsetzungsbedarf ab. Die Ursachen hierfür sind vor allem auf das vergleichsweise hohe Alter vieler Anlagen und die daraus resultierenden Dauerhaftigkeitsprobleme infolge jahrzehntelanger Beanspruchung unterschiedlichster Art zurückzuführen. Für die Instandsetzung der Betonbauteile dieser Bauwerke stehen bewährte Materialien und Verfahren zur Verfügung, die unter bestimmten Randbedingungen eingesetzt werden können. Es gibt jedoch Fälle, bei denen die bislang verwendeten Instandsetzungssysteme ungeeignet sind. Forschungsbedarf ergibt sich insbesondere in zwei Bereichen:

Bei bestimmten Bauwerken, wie z. B. Einkammerschleusen, kann eine mehrmonatige Außerbetriebnahme für die Instandsetzung nicht akzeptiert werden. Es sind daher Instandsetzungssysteme zu konzipieren, die eine Instandsetzung in begrenzten Zeitfenstern „unter Betrieb“ zulassen.

Die für Schleusenkammern bewährte Instandsetzung durch dicke, rückverankerte Vorsatzschalen ist prinzipiell für alle Wasserbauwerke möglich. Es gibt aber auch eine Reihe Bauwerke (wie z. B. Wehrpfeiler), bei denen zur Aufrechterhaltung der Dauerhaftigkeit lediglich der oberflächennahe Beton zu schützen ist, Oberflächenschutzsysteme aufgrund der Feuchteexposition jedoch versagen. Als vielversprechende Lösung für solche Fälle wird die Entwicklung „dünn-schichtiger“ Instandsetzungssysteme als Ort- oder Spritzbeton angesehen.

Die Entwicklung neuer Instandsetzungssysteme hat in den letzten Jahren aufgrund der intensiven Materialentwicklung einiger Hersteller große Fortschritte gemacht. Einerseits wurden schnell erhärtende Systeme entwickelt, deren Eignung z. T. bereits an Wasserbauwerken überprüft wurde (Reschke, 2011). Andererseits wurden im Rahmen von Feldversuchen an Wasserbauwerken einige Instandsetzungssysteme in ihren Eigenschaften z. T. so modifiziert, dass auch bei Altbetonen geringerer Güte ein guter und dauerhafter Verbund sichergestellt wurde (IMF Feldversuch 1998 und 2002), womit eine Applikation in Form dünn-schichtiger Vorsatzschalen grundsätzlich möglich wird.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Mit schnell erhärtenden Instandsetzungsbetonen können die Betoninstandsetzungsmaßnahmen so konzipiert werden, dass eine Unterbrechung der Schifffahrt nur innerhalb sehr eng bemessener Zeitfenster (wenige Stunden pro Tag) notwendig wird. Somit können auch bei Wasserstraßen mit nur einer Schleusenkammer (z. B. Mosel, oberer Main) Sperrungen für die Schifffahrt, welche bei größeren Baumaßnahmen ca. ½ - 1 Jahr dauern können und ggf. zu einer Verlagerung des Transportaufkommens auf Schiene und Straße führen, vermieden werden.

Durch die Entwicklung von Instandsetzungssystemen in Form dünn-schichtiger Vorsatzschalen kann für eine Reihe von Bauwerken die Nutzungsdauer durch eine dauerhafte und gegenüber den dicken Vorsatzschalen deutlich kostengünstigere Instandsetzung verlängert werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens soll die Eignung von Instandsetzungssystemen getestet werden, die ggf. beide Eigenschaften (schnell erhärtend und dünn-schichtig) vereinen. Bei entsprechendem Nachweis der Materialeignung sowie der Technologie soll die Anwendung der Systeme für die WSV zugänglich gemacht werden.



## 2 Untersuchungsmethoden

Im ersten Schritt sollen zunächst die Materialeigenschaften bezüglich der wasserbauspezifischen Anforderungen an kleineren Verbundprobleplatten von ca. 0,5 m<sup>2</sup>, welche von den Materialentwicklern zur Verfügung zu stellen sind, im Baustofflabor geprüft werden.

Bei entsprechender Eignung sollen im 2. Schritt Probeflächen größerer Abmessungen von jeweils ca. 15 m<sup>2</sup> im Rahmen eines Technologieversuches hergestellt werden. Dabei soll neben der Materialeignung auch die Frage der Applikation (Spritzbeton oder Ortbeton) untersucht werden, was ggf. mit der Entwicklung spezieller Schalungssysteme verbunden ist. Aus den Probeflächen werden wiederum Proben entnommen und bezüglich der wasserbauspezifischen Anforderungen im Baustofflabor geprüft.

Nach erfolgreichem Abschluss der Technologieversuche soll im 3. Schritt die Anwendbarkeit und Dauerhaftigkeit durch Probeinstandsetzungen an Verkehrswasserbauwerken verifiziert werden.

## 3 Ergebnisse

Die Eignung verschiedener, gemäß den Vorgaben der neuen ZTV-W LB 219 speziell angepasster Instandsetzungsmaterialien wird im Rahmen eines „Technologieversuches“ an größeren Probeflächen getestet. Dafür wurde auf dem Gelände der BAW eine 10 m lange und 2 m hohe Versuchswand mit einem Stampfbeton geringer Festigkeit errichtet. Die besondere Struktur alter Wandflächen wurde durch anschließendes Abstrahlen mit HDW erreicht.

Im Sommer 2005 wurden auf die ersten vier Teilflächen á 2,5 m x 2,0 m unterschiedliche Instandsetzungsmörtel SPCC mit an die geringe Betonqualität des Untergrunds (Altbetonklasse A2) angepassten Eigenschaften appliziert, welche z. T. hinsichtlich des Schwindverhaltens und E-Moduls modifiziert waren.

Im Oktober 2009 wurde auf die fünfte Teilfläche á 2,5 m x 2,0 m ein schnell erhärtendes Material in Ortbetonbauweise (geschaltes System) aufgebracht. Das Material (ein SCC) war so konzipiert, dass es sich selbst verdichtet.

Alle Flächen wurden in den vergangenen Jahren regelmäßig bewertet. Neben der augenscheinlichen Beurteilung auf Rissbildungen wurde das Verbundverhalten untersucht. Insbesondere die Prüfungen nach mehreren Jahren Standzeit zeigen, dass die für den vorhandenen Untergrundbeton geforderte Verbundfestigkeit von mindestens 0,8 N/mm<sup>2</sup> mit allen Materialien eingehalten wird und es bislang zu keiner relevanten Verbundschwächung gekommen ist. Die spezielle Anpassung der Materialien im Hinblick auf die Begrenzung des Schwindens und E-Moduls hat sich demnach grundsätzlich bewährt.

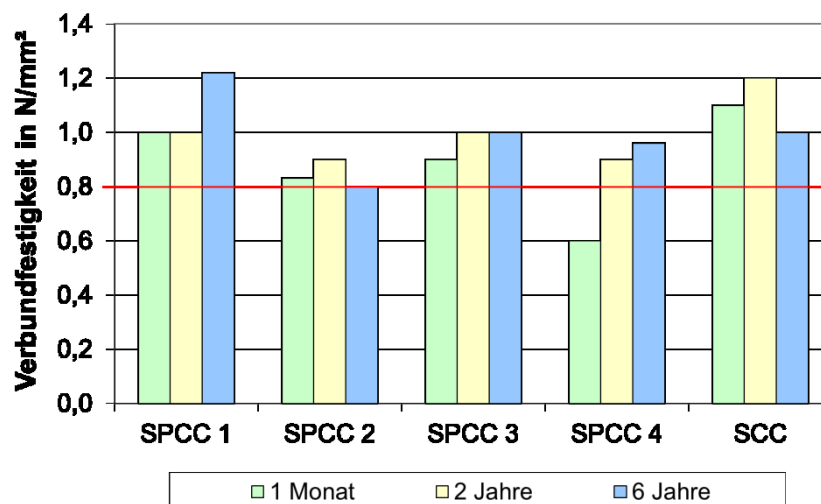


Bild 1: Verbundfestigkeit der Materialien an den Probeflächen der BAW

Aufgrund einer flächigen Schalenabplatzung im Tidebereich an einem Wehrpfeiler des Eidersperrwerks ergab sich im August 2013 die Gelegenheit, einen schnell erhärtenden Instandsetzungsmörtel unter Bauwerksbedingungen zu erproben. Als Material wurde der an der BAW-Versuchsfläche in 2009 eingesetzte schwindreduzierte SCC (geschaltes System) ausgewählt. Dieser wurde für den Einsatz im Meerwasserwechselbereich (Expositionsklasse XF4) mit Luftporen modifiziert.

Die Applikation des SCC erfolgte von einem Arbeitsponton. Das Zeitfenster bis zum Fluten der Reparaturfläche durch die ansteigende Tide betrug nur rund 6 Stunden. Innerhalb dieser Zeit wurde die Fläche gereinigt, die vorbereitete Schalung fixiert und der SCC so eingefüllt, dass er bis zum ersten Kontakt mit dem Meerwasser ausreichend erhärtet war (mindestens 3 Stunden). Dieses Konzept der Instandsetzung in einem kurzen Zeitfenster hat sich grundsätzlich bewährt. Die Dauerhaftigkeit muss jedoch durch eine längerfristige Beobachtung und Probenahmen am Bauwerk nachgewiesen werden.



*Bild 2: Reparaturfläche Eidersperrwerk im Sommer 2014*

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Abschließende Dokumentation der Versuchsflächen auf dem BAW-Gelände und Erstellung des Abschlussberichts bis Ende 2016.

Die im Sommer 2013 am Eidersperrwerk im Meerwasserwechselbereich mit dem SCC-LP angelegte Instandsetzungsfläche soll auch nach Ablauf des FuE-Vorhabens weiter regelmäßig beobachtet und beprobt werden.

Laufzeit des Vorhabens: 2003 bis 2016.

#### **5 Literatur**

IMF AG: Feldversuch 1998 und 2002.

#### **6 Veröffentlichungen**

Reschke T. (2011): Instandsetzung unter Betrieb mit einem schnell erhärtenden Spritzbeton – Probe- maßnahme Schleuse Feudenheim. BAW-Mitteilungsblatt 2011; Nr. 93: 7-28.

## **Injektion Vorsatzschale**

**Netzplan-Nr.:** A39510310234

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. (FH) H. Müller, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** hilmar.mueller@baw.de

## **1 Problemstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Der Kernbeton von älteren Schleusenkammerwänden wird oft durch Vorsatzschalen vor Nassfrost-einwirkung und Witterungsbeanspruchung geschützt. In der Verbundzone kommt es durch eindrin-gendes Schleusenwasser zu Verbundstörungen und Ablöseerscheinungen der Vorsatzschale vom Kernbeton. Der Spaltwasserdruck wirkt auf immer größere Flächen hinter der Vorsatzschale. Die Standsicherheit der Vorsatzschale ist ab einem bestimmten, schwer einzuschätzenden Zeitpunkt, nicht mehr gewährleistet.

Neue am Markt befindliche Injektionsmaterialien können zielgerichtet in die Verbundzone injiziert werden. Durch die Steuerung der Konsistenz und Aushärtungscharakteristika werden diese Injekti-onsmaterialien zielgenau platziert. Die Eigenschaften dieser Materialien reichen von spröde bis elas-tisch.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Möglichkeit der Erhaltung von abgängigen Vorsatzschalen ist für die WSV von grundlegender Bedeutung. Sperrzeiten für Instandsetzungen könnten minimiert werden. Die Kosten für die Erhaltung einer Vorsatzschale dürften unter der eines Austausches liegen. Die Auflagen von Denkmalschützern sind leichter einzuhalten.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen soll die Auswahl geeigneter Injektionsstoffe und Verfahren sein. Weiter sollen Parameter für die Ausführbarkeit und Qualitätskontrolle solcher Arbeiten ermittelt werden.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Ein Kammerwandblock der neuen Schleuse Hüntel wurde in vier Versuchsflächen aufgeteilt. Die Vorsatzschale der Versuchsflächen wurde von Mitte April 2007 an während einer Trockenlegung oberflächlich instand gesetzt, indem defekte Klinker und Mörtelfugen ausgetauscht wurden. Die so instand gesetzte Vorsatzschale wurde mit einer Radarantenne abgefahren und auf diese Weise der Ausgangszustand festgehalten und dokumentiert. Weiter wurden WD-Versuche jeweils in Proben-feldmitte im vorsatzschalennahen Kernbeton durchgeführt, um die Wasseraufnahme der Fehlstellen im Kernbeton einschätzen zu können.

In die vier Probeflächen wurden unterschiedliche Materialgruppen (Zementsuspension, Zementleim, Acrylatgel, PUR-Harz) injiziert. Die Injektionen werden durch ein umfangreiches Untersuchungspro-gramm, welches vom Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen durchgeführt worden ist, begleitet.

Nach der Injektion wurden erneut Radarmessungen und WD-Versuche als indirekte Messverfahren durchgeführt. Hiermit sollten die Veränderungen zu den Nullmessungen und damit der Injektionserfolg beurteilt werden. Die Auswertung der Radarmessungen erfolgte durch igp in Karlsruhe. Weiter wurden Ausziehversuche an den injizierten Versuchsflächen vorgenommen und die gezogenen Elemente und die Bruchflächen augenscheinlich beurteilt.

An der gegenüberliegenden Kammerwand wurden Nischen mit Hochdruckwasserstrahltechnik in die Kammerwände gefräst. In diese Nischen wurden während der Trockenlegung neue Pollerreihen

eingebaut. An den Ausbruchflächen konnten die Struktur des Kernbetons mit seinen Fehlstellen aufgenommen und das theoretische Injektionsmodell verifiziert werden.

In einem weiteren Schritt wurde je Versuchsfeld eine Vertikalbohrung in der Verbundzone abgeteufelt. Die Bohrungen wurden im Seilkernrohrverfahren mit Inliner durchgeführt. Die Bohrkernne konnten so äußerst schonend entnommen und geschützt zur Weiteruntersuchung in die BAW transportiert werden. In der BAW wurden die Bohrkernne ausgelegt und angesprochen. Die Ergebnisse der Radarmessungen wurden mit den Bohrkernen verglichen.

Um den Einfluss der verschiedenen Injektionsgüter auf die Radarmessung zu bestimmen, wurden Probebauteile mit genau definierten Fehlstellen hergestellt und injiziert. Die an diesen Probebauteilen durchgeführten Radarmessungen wurden zur Kalibrierung der Messungen am Bauteil genutzt.

### 3 Ergebnisse

Die Messungen zum Ursprungszustand ergaben entgegen den Erwartungen eine schwankende Verteilung der Fehlstellen über die Kammerwandblocklänge. Somit kann zwar der Injektionserfolg über den Vergleich der Messungen vor und nach der Injektion für ein Probefeld bewertet werden, ein direkter Vergleich der Injektionsgüter untereinander ist aber nicht möglich. Auch haben sich bereichsweise bindige Ablagerungen in Hohlräumen gezeigt, die bei der Vorerkundung nicht vorgefunden wurden.

Auffällig war der Einfluss des Alters der Probekörper auf die Radarmessung. So veränderten sich die hydraulischen Bindemittel nicht nur über einen Monat, sondern es war noch ein Einfluss über sechs Monate nach der Herstellung feststellbar.

Die bisherigen Erfahrungen werden derzeit zusammengetragen und Optimierungsmöglichkeiten für künftige Injektionen dieser Art diskutiert.



Bild 1: Injizierter Bohrkern (links), Verbund Vorsatzschale-Kernbeton (rechts)

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016: Erstellung des Abschlussberichtes

Laufzeit des Vorhabens: 2006 bis 2016.

### 5 Literatur

-/-

## **6 Veröffentlichungen**

Eßer, A.; Rubba, U., Patitz, G.; Müller, H. (2009): Ertüchtigung von Schleusenkammerwänden mit Klinkervorsatzschalen durch Injektionen; Tagungsband 1. Kolloquium "Erhaltung von Bauwerken" der TAE Esslingen,

## **Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken**

**Netzplan-Nr.:** A39510310240

**Projektleiter:** Dr.-Ing. T. Reschke, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. A. Rahimi, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** thorsten.reschke@baw.de, amir.rahimi@baw.de

## **1 Problemstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Dauerhaftigkeit neu zu erstellender Betonbauwerke wird nach derzeitigen Regelwerken (DIN EN 206/DIN1045-2/ZTV-W LB 215) deskriptiv durch die Einhaltung von bestimmten, auf Erfahrungswerten beruhenden Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung, -druckfestigkeit und Betondeckung sichergestellt. Eine leistungsbezogene Bewertung nach dem Performance-Konzept, wie bei der Tragwerksbemessung, fehlt. Für eine realistische Abschätzung und Sicherung der Dauerhaftigkeit nach dem Performance-Konzept sind sowohl die relevanten Schädigungsmechanismen (Expositionen) als auch die konkreten Betoneigenschaften (Leistungsfähigkeit des Betons) für den konkreten Anwendungsfall zu berücksichtigen. Seit einigen Jahren wird dieser Problematik „probabilistischer Lebensdauerbemessungsverfahren“ sowohl im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben, Schießl, G. et al. (2011), Gehlen, C., (2000) als auch im Rahmen der europäischen und internationalen Normungsarbeit, *fib* Bulletin 34 (2006), *fib* Model Code (2010), ISO 16204 (2012) nachgegangen. Für den Fall der Depassivierung des Betonstahls infolge Carbonatisierung sowie Eindringen von Chloriden in den Beton wurden bereits entsprechende probabilistische Bemessungsmodelle entwickelt (Gehlen, C. (2000), *fib* Bulletin 34 (2006). Betrachtungen auf Basis entwickelter Bemessungsmodelle sowie Untersuchungen an Bauwerken weisen darauf hin, dass die nach EN 206 / DIN 1045-2 bzw. ZTV-W LB 215 angestrebten Nutzungsdauern von 50 bzw. 100 Jahren durch die deskriptiven Vorschriften nicht in jedem Fall mit ausreichender Wahrscheinlichkeit erreicht werden (DAfStb, 2008).

Bei der Beurteilung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke unter Dauerhaftigkeitsaspekten ohne bzw. nach Ausführung von Instandsetzungsmaßnahmen sind derartige deskriptive Ansätze zumeist nicht ausreichend bzw. mangels entsprechender Informationen zu den Baustoffen nicht anwendbar, praxisgeeignete Bemessungsverfahren auf probabilistischer Basis stehen nicht zur Verfügung.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Notwendigkeit, immer älter werdende Bauwerksbestände mit stark limitierten Haushaltsmitteln unterhalten zu müssen, führte in den letzten Jahren zur Entwicklung von Lebensdauer- bzw. Erhaltungsmanagementsystemen (EMS). Auch für die WSV wird derzeit ein EMS erarbeitet. Durch frühzeitiges Erkennen möglicher Schädigungen und zuverlässige Vorhersagen der Zustandsentwicklung soll eine wirtschaftlich optimierte und nachhaltige Bauwerksunterhaltung und -instandsetzung ermöglicht werden. Grundlage dafür sind entsprechende Schadensentwicklungsmodelle, welche im Rahmen des FuE-Vorhabens hinsichtlich wasserbauspezifischer Bedingungen bewertet und ggf. angepasst werden sollen.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Es sind Bemessungskonzepte zu erarbeiten, die bei gegebenen Betoneigenschaften eine realistische Bewertung der Nutzungsdauer von Wasserbauwerken ermöglichen. Soweit möglich, sind dabei für die Bewertung der relevanten Betoneigenschaften Performance-Prüfungen zu verwenden. Die Dauerhaftigkeitsbemessung soll neben der Bewertung der "Restnutzungsdauer" bestehender Bauwerke auch die Abschätzung bzw. gezielte Planung der Nutzungsdauer nach Instandsetzungsmaßnahmen ermöglichen.



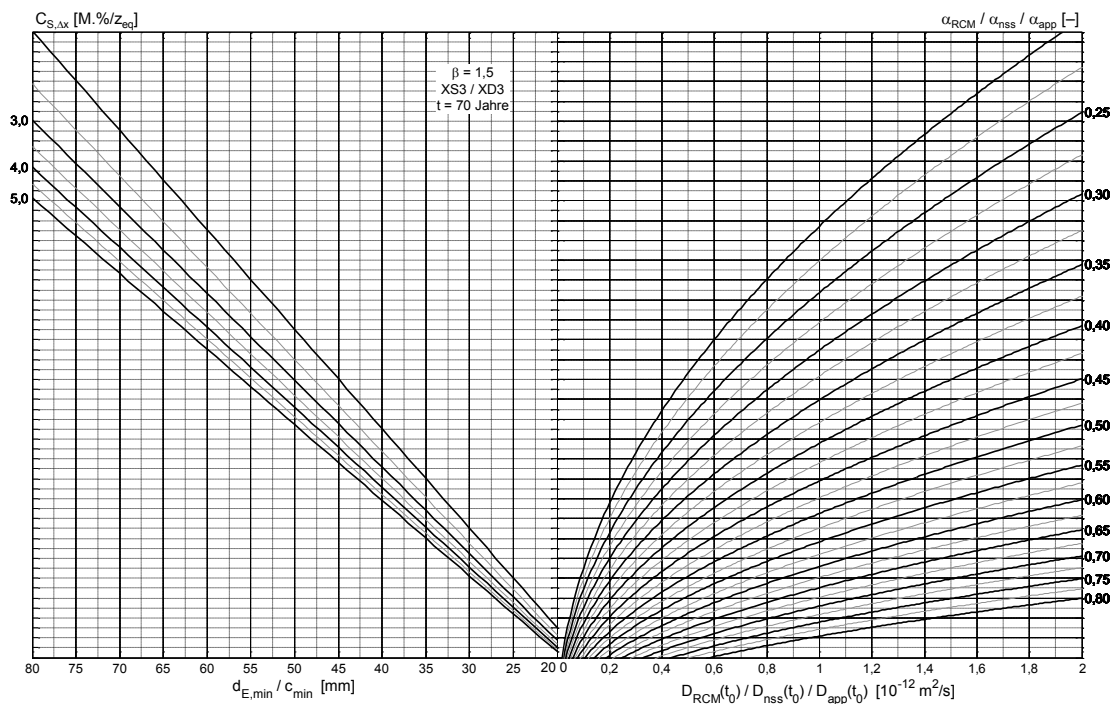
## 2 Untersuchungsmethoden

Die BAW hat in den letzten Jahren zunächst mehrere universitäre Forschungsprojekte begleitet, mit dem Ziel, entsprechende Bemessungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung wasserbauspezifischer Beanspruchungen zu erarbeiten. Zu nennen ist hier insbesondere das DAfStb-Verbundvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“, Teilprojekt D „Lebensdauermanagement“, da hier ein Software-Prototyp erarbeitet wurde, welcher vollprobabilistische Modelle impliziert. Damit können realitätsnahe Zustandsprognosen des Bauwerks direkt am dreidimensionalen Bauwerksmodell dargestellt werden. Durch Berücksichtigung von Untersuchungsergebnissen kann die Prognose zudem sukzessiv zugeschräfft, durch die Anwendung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden mögliche Schädigungen bereits frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden (Schießl et al., 2011).

Aktuell steht seit September 2011 im Rahmen einer Kooperation mit dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München die Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken für den Fall einer chloridinduzierten Bewehrungskorrosion im Fokus. Dieser Themenbereich wurde bislang im FuE-Vorhaben „Chlorideindringwiderstand von Beton“ bearbeitet, die im Rahmen dieses Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse (Gehlen und Fischer, 2007; Gehlen und Osterminski, 2009) wurden übernommen.

## 3 Ergebnisse

Anhand der erzielten Ergebnisse im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalysen zur Überprüfung der deskriptiven Vorgaben der Normung für Neubaumaßnahmen wurden in der Neufassung der ZTV-W LB 215 (2012) entsprechende Anpassungen für die Expositionsklassen XD und XS vorgenommen.



**Bild 1:** Beispielhaftes Nomogramm zur Bemessung von Neubaumaßnahmen und Bewertung von bestehenden Bauwerken; Zielnutzungsdauer  $t_{SL}=70$  Jahre, Zielzuverlässigkeit  $\beta_0=1,5$ , für XS3 und XD3

In einem weiteren Schritt wurde basierend auf probabilistischen Untersuchungen ein vereinfachtes Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Neubaumaßnahmen in XD- und XS-Expositionen erstellt. Darin werden mit Hilfe von Nomogrammen die erforderlichen Materialeigenschaften und die Mindestbetondeckung für eine gewünschte Zielnutzungsdauer und Zielzuverlässigkeit

keit ermittelt (siehe Bild 1). Die Nomogramme können auch zur Abschätzung der Restnutzungsdauer von bestehenden Bauwerken verwendet werden.

Umfangreiche Labor- und Auslagerungsversuche befassen sich mit der Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Instandsetzungsmaterialien sowie dem Chloridtransport in instand gesetzten Betonbauteilen.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Aktuell werden vereinfachte Nachweisverfahren zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz konzipiert. Das Nachweisverfahren erfolgt mittels Bemessungsnomogrammen, die auf probabilistischen Berechnungsverfahren basieren.

Laufzeit des Vorhabens: 2006 bis 2016.

#### 5 Literatur

- DAfStb (2008): Positionspapier des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J.
- fib* (2006): Bulletin 34: Model Code for Service Life Design, prepared by *fib* Task Group 5.6. (2006).
- fib* (2010): Model Code for Concrete Structures (2010).
- Gehlen, C. (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510. Beuth-Verlag, Berlin.
- Gehlen, C., Fischer, C. (2007): Überarbeitung des BAW-Merkblatts Chlorideindringwiderstand von Beton. Forschungsbericht A07/1-1 im Auftrag der BAW, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart.
- Gehlen, C., Osterminski, K. (2009): Zuverlässigkeit Wasserbauwerke – Chlorideindringwiderstand. Forschungsbericht 30-F-0019 im Auftrag der BAW, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München, November.
- ISO 16204 (2010): Durability – Service life design of concrete structures.
- Schießl, P., Gehlen, C. et al. (2011): Verbundforschungsvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“ Lebenszyklusmanagementsystem zur Nachhaltigkeitsbeurteilung – Teilprojekt D. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 586. Beuth-Verlag, Berlin.

#### 6 Veröffentlichungen

- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2013): Long-Term Performance of Concrete Structures in a Marine Environment – Measured and Calculated. In Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Concrete Under Severe Conditions – Environment and Loading (CONSEC13), Nanjing, China.
- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2013): Approaches for Modelling the Residual Service Life of Marine Concrete Structures after Repair. In Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Concrete Under Severe Conditions – Environment and Loading (CONSEC13), Nanjing, China.
- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2014): Approaches for Modelling the Residual Service Life of Marine Concrete Structures. International Journal of Corrosion 1/2014, <http://www.hindawi.com/journals/ijc/2014/432472/abs/>.
- Rahimi, A., Gehlen, C. (2014): Durability Design of Reinforced Concrete Members being Repaired. *fib* Commission 5 Seminar on Durability of Concrete Structures, May 8<sup>th</sup> 2014, Minho – School of Engineering University of Minho.
- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2014): Efficiency of materials used for repair measures of concrete structures exposed to chlorides. 5<sup>th</sup> International Conference on Concrete Repair – Concrete Solutions, 01.-03. September 2014, Belfast – Queen's University Belfast.
- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2014): Bewertung der Leistungsfähigkeit von Instandsetzungsmaterialien und der Lebensdauer von instandgesetzten Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung. In: Beton-Kalender 2015, Kapitel VI. Ernst & Sohn, Berlin.



- Gehlen, C., Rahimi, A., Reschke, T., Westendarp, A. 2015: Bewertung der Leistungsfähigkeit von Instandsetzungsmaterialien und der Lebensdauer von instandgesetzten Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung. In: Beton-Kalender 2015, Kapitel VI. Ernst & Sohn, Berlin.
- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2015): Chloride transport in concrete structural elements after repair. Proceedings of the International fib symposium 2015, Concrete – Innovation and Design, 18.-20. May, Copenhagen, Denmark.
- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2015): Restnutzungsdauer von instandgesetzten Stahlbetonbauteilen unter Berücksichtigung der Chloridumverteilung. Ibausil 2015, 16.-18. September 2015, Weimar, Deutschland.
- Rahimi, A., Gehlen, C., Reschke, T., Westendarp, A. (2015): Impact of Chloride Redistribution on the Service Life of Repaired Concrete Structural Elements. Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV, 5.-7. October 2015, Leipzig, Germany.
- fib* bulletin 76:2015: Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards – Durability of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides. Prepared by *fib* Task Group 8.6: Gehlen, C., Greve-Dierfeld, S. v., Gulikers, J., Helland, S., Rahimi, A. et al.

## **Messverfahren Hydratationswärme**

**Netzplan-Nr.:** A39510370004

**Projektleiter:** Dr.-Ing. F. Spörel, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** frank.sporel@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Entwicklung der Hydratationswärme im Beton ist zur Erfassung der daraus resultierenden Zwangsspannungen insbesondere in massigen Bauteilen von Bedeutung. Daher kommt den Messverfahren zur Erfassung der Hydratationswärmeentwicklung und deren Übertragbarkeit eine besondere Bedeutung zu.

In DIN EN 196-8 verankert ist das Verfahren der Lösungskalorimetrie, bei dem an einem unhydratisierten Zement und an einem für 7 Tage unter genormten Bedingungen hydratisierten Zement die Lösungswärme in einer Säuremischung bestimmt wird. Aus der Differenz wird die Hydratationswärme berechnet. Während der Lagerungsdauer wird die Temperatur konstant gehalten. Die ermittelte Hydratationswärme wird zur Beschreibung der Eigenschaft LH bzw. VLH eines Zementes verwendet. In der Regel erfolgt die Ermittlung der Hydratationswärmeentwicklung im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle nur an Zementen mit der Eigenschaft LH bzw. VLH.

Zunehmende Verbreitung findet derzeit das ebenfalls unter nahezu isothermen Bedingungen prüfende Verfahren der isothermen Wärmeflusskalorimetrie. Bei diesem Verfahren erfolgt eine kontinuierliche Aufzeichnung der Wärmefreisetzung. In der Zementindustrie wird dieses Verfahren zunehmend häufiger eingesetzt. Derzeit laufen Bestrebungen, dieses Verfahren zukünftig auch normativ zu verankern.

Die Bestimmung der Hydratationswärme im teiladiabatischen Versuch nach DIN EN 196-9 (Thermosflaschenversuch) ist in Deutschland nicht weit verbreitet, wird aber beispielsweise im Rahmen von Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen von Massenbetonen eingesetzt. Die Temperaturentwicklung eines Mörtels wird kontinuierlich gegen eine bereits erhärtete Mörtelprobe aufgezeichnet und daraus die freigesetzte Hydratationswärme ermittelt. Nach DIN EN 196-9 ergibt sich nach einer Prüfdauer von 41 Stunden die beste Korrelation zu den Ergebnissen der Lösungskalorimetrie nach DIN EN 196-8 nach 7 Tagen. Ergänzend können in einem etwas abgewandelten Thermosflaschenversuch auch Betone bis zu einem Größtkorn von 32 mm untersucht werden. Aufgrund der durch die teiladiabatischen Verhältnisse entstehenden geringeren Temperaturen im Vergleich zur adiabatischen Messung handelt es sich hier um eine untere Abschätzung der adiabatischen Wärmefreisetzung. Eine rechnerische Abschätzung der adiabatischen Temperaturentwicklung ist jedoch möglich.

Die BAW und verschiedene andere Institutionen arbeiten mit adiabatischen Betonkalorimetern. In einem adiabatischen Betonkalorimeter wird die adiabatische Temperaturerhöhung des Beton direkt ermittelt. Schwierigkeiten bestehen in der Sicherstellung der adiabatischen Randbedingungen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Hydratationswärmeentwicklung ist im Bereich der WSV bei dem Großteil der Bauvorhaben von Interesse, da häufig massige Bauteile vorhanden sind. Durch die Anwendung alternativer Prüfverfahren zur Hydratationswärmebestimmung mit geringerem Aufwand als bei den Kalorimeterversuchen oder großformatigen Betonblöcken wird auch im Hinblick auf die Anwendung von Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Hydratationswärme ein Erkenntnisgewinn erwartet. Die Bewertbarkeit von mit unterschiedlichen Prüfmethoden ermittelten Temperaturerhöhungen wird verbessert. Ausgangsstoffuntersuchungen zur Optimierung der Freisetzung von Hydratationswärme könnten bei Eignung der Verfahren im Vorfeld von Baumaßnahmen mit deutlich reduziertem Aufwand durchgeführt werden, um eine Optimierung der Betonzusammensetzung in Bezug auf die Hydratationswärmeentwicklung zu erreichen.

### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchungen ist es, über ein vergleichendes Prüfprogramm Erkenntnisse zu gewinnen, wie die Messergebnisse der einzelnen Prüfverfahren zur Messung der Hydratationswärme korrelieren, und wie eine Übertragung auf die bei der BAW durchgeführten Kalorimeterversuche bzw. der Messungen am Betonblock von 2 m x 2 m x 2 m möglich ist. So können die mit unterschiedlichen Messverfahren bestimmten Ergebnisse besser auf deren Aussagekraft im Hinblick auf die Hydratationswärmeentwicklung im Bauteil eingeschätzt werden. Ebenfalls von Interesse sind in diesem Zusammenhang Erkenntnisse, für welche Anwendungen die einzelnen Prüfverfahren alternativ oder ergänzend zu den Kalorimetermessungen eingesetzt werden können und ob bzw. mit welchen Grenzen eine Verwendung der Ergebnisse zur Berechnung der Hydratationswärme im Bauteil möglich ist. Die Ergebnisse der Auswertung sollen weiterhin als Entscheidungshilfe über eine evtl. Anschaffung einer geeigneten Messeinrichtung bei der BAW dienen. Ergänzend zu den teiladiabatischen Verfahren wird ein adiabatisches Betonkalorimeter entwickelt und gebaut. Hier erfolgt eine Zusammenarbeit mit dem KIT.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Erkenntnisgewinne sollen über eine Literatursichtung und die Durchführung von Messungen der Hydratationswärme mit den verschiedenen Messverfahren erfolgen. Da die erforderlichen Messeinrichtungen bei der BAW nicht vorhanden sind, werden die Prüfungen extern vergeben. Dabei handelt es sich um die

- Hydratationswärmebestimmung mit der Lösungskalorimetrie nach DIN EN 196-8
- Hydratationswärmebestimmung mit der isothermen Wärmeflusskalorimetrie
- Hydratationswärmebestimmung mit dem teiladiabatischen Verfahren nach DIN EN 196-9 an einem Normmörtel und einer aus einem Vergleichsbeton abgeleiteten Mörtelzusammensetzung.
- Hydratationswärmebestimmung mit dem teiladiabatischen Verfahren am Beton

Die Ausgangsstoffe werden so ausgewählt, dass eine Anbindung der Ergebnisse an Messungen, die bei der BAW mit dem adiabatischen Kalorimeter durchgeführt wurden, möglich ist. Für die Auswertung und den Vergleich mit den adiabatischen Kalorimetermessungen ist eine Umrechnung der Messdaten der teiladiabatischen Versuche erforderlich. Anschließend erfolgt eine Bewertung der einzelnen Messverfahren im Hinblick auf deren Einsatzmöglichkeit zur Abschätzung der Hydratationswärme in Bauteilen.

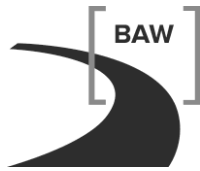
## 3 Ergebnisse

Bislang wurden fünf Betonrezepturen, die auch bei aktuellen Baumaßnahmen innerhalb der WSV zum Einsatz kommen, untersucht. Erste Ergebnisse deuten an, dass prinzipiell mit teiladiabatischen Betonversuchen eine eher untere Abschätzung der adiabatischen Wärmeentwicklung erfolgen kann. Weiterhin deuten die ersten Untersuchungen an, dass aus Ergebnissen isothermer Prüfverfahren berechnete Wärmeentwicklungen die adiabatische Temperaturentwicklung teilweise deutlich unterschätzen. Die Entwicklung und der Bau eines neuen adiabatischen Betonkalorimeters werden voraussichtlich in 2016 abgeschlossen.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2016: Die Ergebnisse werden in einem Sachstandsbericht zusammengefasst und bewertet sowie ein Ausblick auf die Anwendungsmöglichkeiten rechnerischer Verfahren zur Bestimmung der quasiadiabatischen Temperaturerhöhung dargestellt. Weiterhin werden die Entwicklung und der Bau des neuen adiabatischen Betonkalorimeters abgeschlossen und das Kalorimeter wird in Betrieb genommen.
- 2017: Erstellung des Abschlussberichtes

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2017 (beantragt).



## **5 Literatur**

-/-

## **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Ertüchtigung der Bewegungsfugen von Massivbauwerken im Verkehrswasserbau**

**Netzplan-Nr.:** A39510370006

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. M. Maisner, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** matthias.maisner@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Ertüchtigung undichter Bewegungsfugenbereiche ist bereits heute ein wichtiges Thema für die WSV. In Anbetracht der voraussichtlich weiter zunehmenden Anzahl schadhafter Fugen sollen Instandsetzungsvarianten für verschiedene Randbedingungen erarbeitet werden.

Für die Ertüchtigung von Bewegungsfugen werden in der WSV bereits verschiedene Materialien und Verfahren eingesetzt. Hierbei handelt es sich in erster Linie um nachträglich an der schleusenkamerseitigen Wandoberfläche aufgesetzte Fugenbänder (Schleusen Uelzen 1, Leerstetten und Eibach) oder die Injektion von Bewegungsfugen mit Produkten auf der Basis von PUR und Acrylatgelen (diverse Schleusen am MDK). Die bisherigen nachträglich aufgesetzten Fugenbandkonstruktionen sind zeit- und kostenaufwendig. PUR und Acrylatgele müssen unter technischen und umweltrelevanten Aspekten kritisch hinterfragt werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Zahl schadhafter Bewegungsfugen wird angesichts der Altersstruktur des Baubestandes in den kommenden Jahren voraussichtlich wachsen. Die WSV benötigt Lösungen für die Ertüchtigung solcher schadhafter Bewegungsfugen, um unplanmäßige Wasserdurchtritte und die hiermit verbundenen Risiken (z. B. Bodenumlagerungen) zielsicher unterbinden zu können.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel dieses Vorhabens ist es, systematisch für verschiedene Randbedingungen (u. a. Größenordnung der Fugenweitenänderung, Zugänglichkeit der instand zu setzenden Bewegungsfuge, dauernde oder temporäre Wasserbeaufschlagung, Umweltaspekte, Wasserdruck und Temperatur) geeignete Instandsetzungsverfahren und Instandsetzungsmaterialien zu definieren und die zugehörigen Anforderungen an Bauverfahren und Baustoffe festzulegen. Erfahrungen mit bereits realisierten Instandsetzungsmaßnahmen sollen hierbei berücksichtigt werden. Der WSV sollen Informationen an die Hand gegeben werden, mit deren Hilfe sie unter technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Aspekten optimale Lösungen für den jeweiligen Anwendungsfall auswählen kann.

### **2 Untersuchungsmethoden**

- Zusammenstellung und Kategorisierung typischer Bewegungsfugenausbildungen und Fugenwerkstoffe an Bauwerken der WSV
- Zusammenstellung der Schäden und Ursachen für defekte Bewegungsfugen
- Zusammenstellung und Kategorisierung der Anforderungen an Bewegungsfugen
- Erstellung einer Übersicht über bereits ausgeführte Ertüchtigungsmaßnahmen und deren Nachhaltigkeit
- Erarbeitung von Ertüchtigungslösungen für schadhafte Bewegungsfugen in Abhängigkeit bestimmter Randbedingungen (u. a. Fugenweitenänderung, Zugänglichkeit, dauernde oder temporäre Wasserbeaufschlagung, Umweltaspekte, Wasserdruck und Temperatur)
- Exemplarische Ermittlung des Berstdruckes eines gewebeverstärkten Klemmfugenbandes
- Untersuchung der Fugeninstandsetzung-Variante "Überbohren der Fugen" mit einem modifizierten SBK an einer Fuge im Modellmaßstab.

Die im parallel zu bearbeitenden FuE-Vorhaben "Einsatz von Acrylatgelen und gelartigen Produkten für Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbauwerken im Verkehrswasserbau" gewonnenen Erkenntnisse sollen in das vorliegende FuE-Vorhaben einfließen.

### 3 Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit dem WSA Aschaffenburg wurde 2010 bei der Doppelschleuse Kleinostheim eine Dehnungsfuge im Längskanal und eine Fuge der Schleusenammer mit einem stahlseilbewehrten Dichtungsband (SBK) ausgerüstet. Bei der Ausbildung der Flanschkonstruktion war es von Vorteil, dass im Bereich der Richtungsänderung Sohle/Kammerwand auf die Flanschkonstruktion verzichtet werden kann. Für die dauerhafte Klemmung des SBK wurden Tellerfedern eingesetzt. Diese Konstruktionsanordnung wurde zuvor im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht. Die ersten Beobachtungen zeigen, dass diese Instandsetzungsvariante eine Ertüchtigungsalternative für Fugen mit Richtungsänderungen in der Abdichtungsebene darstellt. Für die Abdichtung des Längskanals war es entscheidend, dass die Abdichtungsebene endlos hergestellt werden konnte. Die bisherigen Instandsetzungsmethoden haben den Nachteil, dass für die gesamte Maßnahme zur Fugeninstandsetzung eine Trockenlegung mit entsprechender Schifffahrtssperre erforderlich ist. Im Rahmen einer Bachelorthesis im Studiengang Bauingenieurwesen der Hochschule Karlsruhe wurde unter Betreuung der BAW die Methode "Überbohren der Fuge in Kombination mit einer Klemmkonstruktion" unter bestimmten Randbedingungen untersucht. Die bisherigen Ergebnisse zeigen eine Option für eine Anwendung innerhalb eines Pilotprojektes. Das "Überbohren der Fuge" hat den Vorteil, dass das vertikale Abteufen der Bohrung von der Plattform bis auf Unterwasserhöhe unter Schleusenbetrieb erfolgen kann.



*Bild 1: Betonmodell für die Fugensimulation in der BAW*

In 2014 wurden weitere Untersuchungen an dem Betonmodell durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse erfolgten erste Planungen für eine Pilotanwendung der Variante "Überbohren der Fuge in Kombination mit einer Klemmkonstruktion".

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016: Durchführung eines Pilotprojektes zu der Variante "Überbohren der Fugen" an einem Schleusenbauwerk unter Teilbetrieb, mit einer Bohrfirma bei der hinter der bisherigen Abdichtungsebene der Fugenspalt überbohrt wird und die Bohrung bis auf die Höhe der Schleusensohle läuft. In die Bohrung wird ein modifiziertes SBK einbetoniert. Im Bereich der Sohle wird das SBK geklemmt. Weitere Erarbeitung von Ertüchtigungslösungen für schadhafte Bewegungsfugen in Abhängigkeit bestimmter Randbedingungen (u. a. Fugenweitenänderung, Zugänglichkeit, dauernde oder temporäre Wasserbeaufschlagung, Umweltaspekte, Wasserdruck und Temperatur). Exemplarische Ermittlung des Berstdruckes in Abhängigkeit der Fugenbewegung

eines aufgesetzten gewebeverstärkten Klemmfugenbandes in einer Versuchseinrichtung für Omega-fugenbänder unter Berücksichtigung einer Losflanschkonstruktion.

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2016.

## **5 Literatur**

-/-

## **6 Veröffentlichungen**

Maisner, M.; Becker, H. (2013): Fugeninstandsetzung mit einem stahlseilbewehrten Klemmfugenband, Tagungsband BAW Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Karlsruhe 2013

## **Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung**

**Netzplan-Nr.:** A39510370008

**Projektleiter:** Dr.-Ing. F. Spörel, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** frank.spoerel@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Im Bereich des Verkehrswasserbaus werden Betonoberflächen durch Hydroabrasion in unterschiedlicher Ausprägung beansprucht (Tosbecken, Wehrrücken, Sparbeckenzuläufe, Schleusensohlen, Schleusenkammerwände). Auf europäischer Ebene wird der Verschleißwiderstand im Regelwerk der EN 206-1 nicht gesondert behandelt. Im nationalen Anwendungsdokument der DIN 1045-2 wird zur Beschreibung der Intensität der mechanischen Verschleißbeanspruchung eine Expositionsklasseneinteilung XM1 bis XM3 vorgenommen. Diese wurde bei der Erarbeitung der ZTV-W LB 215 bzw. 219 übernommen. Inwiefern die im Wesentlichen aus Verkehr herrührende Expositionsklassensystematik der DIN 1045-2 auch die Hydroabrasion angemessen beschreibt, ist ungewiss. Eine Überprüfung und ggf. Anpassung der Regelungen wäre daher erforderlich. Auch auf der Widerstandsseite ist zu klären, wie angemessen die deskriptiven Regelungen der DIN 1045-2 zur Sicherstellung eines ausreichenden Widerstandes gegenüber Verschleiß durch Hydroabrasion sind.

Derzeit existiert kein standardisiertes Prüfverfahren mit festgeschriebenen Abnahmekriterien, welches diese kombinierte Beanspruchung zufrieden stellend abbilden kann. Aussichtsreiche Untersuchungsmethoden basieren derzeit auf der Verschleißprüfmaschine nach Bania (Bania, 1989). Weiterentwicklungen dieser Prüfeinrichtung werden in (Haroske, 1998), (Vogel, 2011) beschrieben. In der BAW wurde in der Vergangenheit die Unterwassermethode nach ASTM C1138M verwendet. In (Helbig, Horlacher, 2007) wird auf Betonuntersuchungen mit einer Versuchseinrichtung in Anlehnung an das Prüfgerät zur Bestimmung der Abriebbeständigkeit von Geotextilien nach RPG (BAW, 1994) verwiesen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Hydroabrasion ist eine Beanspruchung des Betons, die wesentlich im Verkehrswasserbau auftreten kann. Bei Bauwerken wie beispielsweise Tosbecken oder Wehrrücken, die einer solchen Beanspruchung ausgesetzt sind, ist es daher von zentraler Bedeutung, dort Betone oder Betonersatzsysteme einzusetzen, die der Beanspruchung einen ausreichenden Widerstand entgegensetzen. Aufwendige Instandsetzungen derartiger Bauteile sollen damit künftig möglichst vermieden bzw. erforderliche Instandsetzungsmaßnahmen dauerhaft gegenüber dieser Beanspruchung ausgeführt werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Die Untersuchungen verfolgen drei wesentliche Ziele hinsichtlich der Beschreibung der Einwirkungs- und Widerstandsseite für den Bereich der Hydroabrasion:

- a) Erarbeitung einer Klassifizierung analog zur Expositionsklassensystematik für die Hydroabrasionsbeanspruchung in Zusammenarbeit mit der TU Dresden.
  - Berücksichtigung vorliegender Erfahrungen der WSV
  - Durchführung von 3D-hydrodynamische Simulationen
  - Definition von Abrasionsregimen für bestimmte Bauteilgruppen
  - Ableitung von Hydroabrasionsklassen
- b) Bewertung von Performance-Prüfverfahren hinsichtlich deren Eignung zur Beurteilung wasserbau-relevanter Schädigungsmechanismen durch Hydroabrasion
- c) Erarbeitung von Anforderungen an Betonausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen zur Sicherstellung eines hinreichenden Widerstandes gegenüber Hydroabrasion



## 2 Untersuchungsmethoden

Die Erkenntnisgewinne sollen über eine Literatursichtung, theoretische Betrachtungen sowie Bauwerks- und Laboruntersuchungen gewonnen werden. Im Labormaßstab werden drei für die Beanspruchung aus Hydroabrasion geeignete Prüfverfahren zur Bewertung des Betonwiderstandes herangezogen. Begleitet werden die Untersuchungen durch anerkannte Experten auf dem Gebiet der Hydroabrasion.

## 3 Ergebnisse

Die Erarbeitung von Schritt a) ist mit einem Vorlauf zu den Schritten b) und c) in Zusammenarbeit mit der TU Dresden, Institut für Wasserbau erfolgt. Erste Vorschläge für eine Klassifizierung der Hydroabrasionsbeanspruchung wurden erarbeitet und werden Anfang 2016 in einem Abschlussbericht zusammengefasst. Mit den Prüfeinrichtungen der BAW wurden in 2015 Vergleichsuntersuchungen begonnen mit dem Zweck, Versuchsrandbedingungen für die weiterführenden Untersuchungen abzuleiten (Bild 1).



*Bild 1: Prüfkörper vor und nach einer Abrasionsbeanspruchung*

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2016: Ableitung von Hydroabrasionsklassen, Festlegung von Versuchsparametern, Betonzusammensetzungen und Auswerteparameter für die Vorversuche, Durchführung, Auswertung und Bewertung der Vorversuche
- 2017: Festlegung der Prüfmethoden sowie Betonzusammensetzungen für die Hauptversuche, Durchführung der Hauptversuche
- 2018: Auswertung und Bewertung der Hauptversuche, Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2018 (beantragt).

## 5 Literatur

- Vogel, M. (2011): Schädigungsmodell für die Hydroabrasionsbeanspruchung zur probabilistischen Lebensdauerprognose von Betonoberflächen im Wasserbau. Dissertation Karlsruher Institut für Technologie
- Haroske, G. (1998): Beitrag zum Hydroabrasionsverschleiß von Betonoberflächen. Dissertation Universität Rostock
- Bania, A. (1989): Bestimmung des Abriebs und der Erosion von Betonen mittels eines Gesteinsstoff-Wassergemisches. Dissertation Technische Hochschule Wismar
- ASTM C 1138M-05 (2010), Standard Test Method for Abrasion resistance of Concrete (Underwater Method) – ASTM C 1138M-05 (Reapproved 2010)
- Helbig, U.; Horlacher, H.-B. (2007): Ein Ansatz zur versuchstechnischen Simulation und Übertragbarkeit der Hydroabrasion strömungsbeanspruchter Betonoberflächen im Wasserbau. Bautechnik 84, Heft 9, S. 641-645

BAW (1994): Richtlinien für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau (RPG). Bundesanstalt für Wasserbau

## **6 Veröffentlichungen**

Spörel, F. (2012): Hydroabrasion von Beton im Verkehrswasserbau – Einwirkung und Betonwiderstand. Tagungsband 35. Dresdner Wasserbaukolloquium 2012, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 47, S. 77-83

Spörel, F.; Helbig, U.; Westendarp, A., Stamm, J. (2015): Hydroabrasionsbeanspruchung von Verkehrswasserbauwerken. Bautechnik 92, Heft 8, S. 538-548

## **Textilbewehrte Mörtel für die Instandsetzung von Wasserbauwerken**

**Netzplan-Nr.:** A39510370010

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. A. Westendarp, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** andreas.westendarp@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Das bereits im Rahmen des FuE-Vorhabens A39510310238 nachgewiesene Vermögen von Textilbewehrung, Bewegungen von Einzelrissen im Altbeton auf mehrere Risse im Instandsetzungsmörtel zu überführen, ist nur ein Baustein im Hinblick auf die Eignung textilbewehrter Spritzmörtel/Spritzbetone für die Instandsetzung massiger, geringerfester und gerissener Bauteile von Verkehrswasserbauwerken. In der Praxis werden sich die im Rahmen des vorangegangenen FuE-Vorhabens zunächst vereinfachend angenommenen Randbedingungen (vollflächig ausreichender Adhäsionsverbund, kein Durchtritt von Wasser durch das Bauteil hindurch an die Rückseite der Instandsetzungsflächen, keine Ausbildung von Spaltwasserdruck) keineswegs immer einstellen. In einem nächsten Schritt sind deshalb geeignete Verankerungssysteme für textilbewehrte Spritzmörtelschichten zu konzipieren. Für das Gesamtsystem sind geeignete Bemessungsansätze zu erstellen, die es dem sachkundigen Planer derartiger Instandsetzungsmaßnahmen ermöglichen, Textilbewehrung und Verankerung in Abhängigkeit bestimmter Bauwerksgegebenheiten (u. a. Größenordnung eines etwaigen Spaltwasserdrucks) zu konzipieren. Zu prüfen ist weiterhin, inwieweit neben Spritzmörtel/Spritzbetonen auch in Schalung eingebrachte Mörtel oder Betone in Verbindung mit Textilbewehrung Anwendung finden können.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Mit dem Ersatz korrosionskritischer Bewehrung aus Stahl durch Textilbewehrung könnte der WSV ein Verfahren zur Verfügung gestellt werden, mit dessen Hilfe sich Instandsetzungen insbesondere an älteren massiven Wasserbauwerken wie beispielsweise Wehrpfeilern zielsicherer und kostengünstiger als bislang realisieren ließen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist es, das Instandsetzungssystem „Textilbewehrte Mörtel und Betone“ dahingehend weiter zu entwickeln, dass der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung geeignete, ausschreibungsreife Lösungen für bestimmte Randbedingungen (freibewittert/Wasserwechselbereich; mit/ohne Spaltwasserdruckansatz etc.) zur Verfügung gestellt werden können. Als potentiell Anwendungsgebiet für derartige Instandsetzungslösungen sind hierbei insbesondere die alten Wehranlagen an Main, Neckar, Weser etc. in den Fokus zu nehmen.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Das Forschungsvorhaben soll in drei Teile gegliedert werden:

**Teil 1:** Begutachtung der am Wehr Horkheim im Rahmen des FuE-Vorhabens A39510310238 angelegten Probestellen inkl. Auswertung der begleitenden Bauwerksmessungen; Untersuchungsbericht

**Teil 2:** Fachliche Begleitung des DFG-Transferprojektes T09 „Schutzschichten aus textilbewehrtem Spritzmörtel zur Instandsetzung von Wasserbauwerken“ der RWTH Aachen

*Anmerkung: Im DFG-Transferprojekt T09 werden wesentliche noch offene Fragen zu textilbewehrten Spritzmörteln behandelt, eigene Aufwendungen seitens der BAW sind hier, von der fachlichen Begleitung und Steuerung abgesehen, nicht erforderlich.*

**Teil 3:** Bearbeitung in Teil 2 offengebliebener grundsätzlicher Fragestellungen. Fachliche Begleitung der Instandsetzung von Wehrpfeilern des Neckarwehrs Horkheim mittels textilbewehrtem Mörtel/Beton im Rahmen der Grundinstandsetzung

### 3 Ergebnisse

#### Zu Teil 1:

In 2013/2014 wurden die im Rahmen des FuE-Vorhabens A39510310238 an Wehrpfeilern der Wehranlage Horkheim erstellten Probeflächen (Spritzmörtel mit unterschiedlicher Textilbewehrung) durch die RWTH Aachen begutachtet, der Untersuchungsbericht liegt vor. Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- An keiner der Probeflächen konnte mittels der durchgeführten Untersuchungen ein Versagen der SPCC-Schichten festgestellt werden.
- Die maximal im Zeitraum 9/2010 bis 6/2013 gemessenen Rissbreitenänderungen lagen bei etwa 0,28 mm.
- Alle im Rahmen der Untersuchungen detektierten Rissbreiten in den textilbewehrten SPCC-Schichten sind kleiner als 0,1 mm.
- Bei den textilbewehrten Probeflächen kann ein direktes „Durchschlagen“ der im Untergrund vorhandenen Risse, anders als bei der unbewehrten Probefläche, zielsicher vermieden werden.
- Die Messungen mittels Dehnungsmessstreifen zeigen, dass die textilbewehrte Schicht im enthafteten Bereich neben den Rissen bei Rissöffnung wie geplant Zugspannungen aufnimmt.
- Im Rahmen der Haftzugprüfungen wurde ein Mittelwert von 1,6 N/mm<sup>2</sup> bestimmt. Einzelwerte lagen unterhalb 1,0 N/mm<sup>2</sup>. Durch die textile Bewehrung wurde die Haftzugfestigkeit gegenüber einer unbewehrten SPCC-Schicht teilweise reduziert.

#### Zu Teil 2:

Im Rahmen einer Arbeitsgruppe aus RWTH Aachen, Fa. w+s und BAW wurden Lastansätze für die Beanspruchung des Verbundes zwischen Altbeton und textilbewehrter Mörtelschicht definiert, welche als Grundlage für die Entwicklung von Ankersystemen dienen.

Das DFG-Transferprojektes T09 wurde planmäßig zum 31.12.2014 beendet, der Abschlussbericht liegt seit 12/2015 im Entwurf vor und muss von den Projektpartnern noch genehmigt werden. Offene Fragen u. a. zu den Verankerungselementen, zum Verhalten bei rückseitigem Wasserdruck und zur Dauerhaftigkeit können im Rahmen des Transferprojektes nicht abschließend beantwortet werden. Seitens der RWTH Aachen werden hierzu derzeit außerhalb des Transferprojekts weiterführende Untersuchungen vorgenommen. Die BAW wird in 2016 prüfen, inwieweit hiermit die noch offenen wasserbauspezifischen Fragestellungen insbesondere im Hinblick auf Instandsetzungsmaßnahmen bei rückwärtigem Wasserzutritt doch noch beantwortet werden können.

#### Zu Teil 3:

Seitens der BAW ist zu prüfen, ob auf Basis der insgesamt vorliegenden Erkenntnisse zumindest für Teilbereiche der Wehrpfeileraußenflächen des Wehrs Horkheim (stark gerissene Flächen oberhalb Oberwasserstand) ein vergabereifes Instandsetzungskonzept erstellt werden kann, welches dann im Zuge der aktuellen Baumaßnahme doch noch realisiert werden könnte.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016: Bearbeitung der unter Abschnitt 3, zu Teil 2 und zu Teil 3, genannten offenen Punkte. Beendigung des Vorhabens.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2016.

### 5 Literatur

-/-

### 6 Veröffentlichungen

Morales Cruz, C.; Raupach, M.; Westendarp, A.; Bruder, S. (2014): Untersuchungen an einer vier Jahre alten Schutzschicht aus textilbewehrtem Spritzbeton am Wehr Horkheim. Beton 10/2014, S. 390-395, Verlag Bau+Technik.

## **Instandsetzung von Schleusenanlagen unter Betrieb (IuB)**

**Netzplan-Nr.:** A3950370011

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. A. Westendarp, Abteilung Bautechnik, Referat Baustoffe (B3)

**E-Mail:** andreas.westendarp@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die WSV verfügt über insgesamt 267 Schleusenanlagen mit lediglich einer Schleusenkammer. Von diesen Einkammerschleusenanlagen sind 121 bereits über 80 Jahre, von diesen wiederum 85 sogar über 100 Jahre alt. Gemäß Bauwerksinspektion weisen 42 % der 267 Einkammerschleusen eine Zustandsnote über 3,0 bis 3,5 und 30 % eine Zustandsnote über 3,5 bis 4,0 auf. Angesichts der Altersstruktur und des baulichen Zustandes zeichnet sich bei diesen Bauwerken kurz- und mittelfristig ein erheblicher Instandsetzungsbedarf ab, sofern eine weitere mittel- oder langfristige Nutzung der Schleusenanlagen beabsichtigt wird.

Die Durchführung grundlegender Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbau oder Stahlwasserbau bedingt bei Schleusenanlagen mit nur einer Schleusenkammer bislang eine Außerbetriebnahme der gesamten Schleusenanlage und damit eine Unterbrechung zumindest der durchgängigen Schifffahrt auf der zugehörigen Wasserstraße. Für die Grundinstandsetzung des Massivbaus einer Schleusenanlage mit konventionellen Bauverfahren sind selbst unter günstigen Randbedingungen Mindestbauzeiten von etwa ein bis zwei Jahren (reine Bauzeit) erforderlich. Der Zustand einzelner Schleusenanlagen an einer Wasserstraße differiert selbst bei gleicher oder annähernd gleicher Bauweise und Errichtungszeit stark, ein unmittelbarer Instandsetzungsbedarf der einzelnen Schleusenanlagen an einer Wasserstraße tritt unter rein technischen Gesichtspunkten im Regelfall zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten auf. Die gleichzeitige, zumindest teilweise prophylaktische Instandsetzung aller Schleusenanlagen an einer Wasserstraße innerhalb einer bestimmten Sperrzeit von beispielsweise 2 Jahren dürfte vor diesem Hintergrund genauso wenig ein akzeptabler Weg sein wie wiederkehrende Unterbrechungen der Schifffahrt immer dann, wenn eine weitere Anlage zur Instandsetzung ansteht.

Vor diesem Hintergrund ist die Frage zu beantworten, ob umfassende Instandsetzungsmaßnahmen an Schleusenanlagen zur Sicherstellung einer weiteren mittel- oder langfristigen Nutzung nicht auch unter Schifffahrtsbetrieb bzw. innerhalb bestimmter Zeitfenster, in denen die Schifffahrt kurzzeitig unterbrochen wird, realisiert werden können.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Ein Ersatzneubau einzelner instandsetzungsbedürftiger Schleusenanlagen parallel zum weiterlaufenden Betrieb der vorhandenen Anlage dürfte zwar realisierbar sein, nicht aber ein Ersatzneubau in dem Umfang, wie er sich angesichts Altersstruktur und baulichem Zustand der insgesamt 267 Einkammerschleusenanlagen abzeichnet.

Für die Binnenschifffahrt ist eine mit jeder grundlegenden Instandsetzung an Einkammerschleusenanlagen verbundene ein- oder mehrjährige Unterbrechung zumindest des durchgängigen Verkehrs auf der entsprechenden Wasserstraße nicht akzeptabel. Umfahrungsmöglichkeiten bestehen im Regelfall nicht bzw. bedingen einen erheblichen wirtschaftlichen Mehraufwand. Derartige Szenarien würden mit größter Wahrscheinlichkeit zu Abwanderungen zu anderen Verkehrsträgern führen, welche nur schwer reversibel zu machen wären.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Mit diesem Vorhaben wird das Ziel verfolgt, geeignete Ansätze für eine Instandsetzung von Schleusenanlagen unter Betrieb, also innerhalb zu definierender Zeitfenster pro Tag zu identifizieren, weiter zu entwickeln und zu verifizieren bzw. neue Ansätze zu erarbeiten. Der Kostenaufwand für die Realisierung derartiger Instandsetzungsmaßnahmen als Eingangsgröße für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ist zu ermitteln.

Der WSV sollen Instandsetzungslösungen für die einzelnen Bauteile und unter Berücksichtigung typischer, kategorisierter Randbedingungen an die Hand gegeben werden. Die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten und Grenzen dieses Ansatzes sollen aufgezeigt werden.

Die unter Betrieb zu realisierenden Instandsetzungsverfahren sollen im Hinblick auf die Verlängerung der Restnutzungsdauer des instand zu setzenden Bauteils bzw. Bauwerks gleichwertig zu vergleichbaren, unter konventionellen Randbedingungen durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen sein.

Das Gesamtkonzept „Instandsetzung unter Betrieb“ ist nur dann zielführend, wenn alle instand zu setzenden Bauteile innerhalb der vorgegebenen Zeitfenster bearbeitbar sind, eine längerfristige Sperrung der Schleusenanlage auch nur für die Instandsetzung eines einzigen Bauteils also nicht erforderlich wird.

## 2 Untersuchungsmethoden

Um künftig eine Instandsetzung von Einkammerschleusen unter Betrieb möglich zu machen, müssen die vorliegenden Erkenntnisse auf diesem Themengebiet zusammengetragen und weitergehende Untersuchungen angestellt werden. Dabei ist eine modulare Betrachtung der verschiedenen Bauwerksteile (z. B. Kammerwände, Sohle, Unterhaupt, Oberhaupt) sinnvoll. Es müssen für die einzelnen Bauwerksteile angemessene, voraussichtlich unterschiedliche Instandsetzungsansätze und -verfahren betrachtet werden. Hierbei ist die gesamte Bandbreite bauwerks- und standortabhängiger Randbedingungen von Einkammerschleusenanlagen der WSV wie beispielsweise Altbetonqualität, Bewehrungssituation oder Hubhöhe zu analysieren und zu berücksichtigen. Auf diese Weise soll ein Baukastensystem mit Instandsetzungslösungen für die wesentlichen Bauteile und Randbedingungen bei Einkammerschleusenanlagen entwickelt und der WSV als Planungs- und Ausschreibungsbasis zur Verfügung gestellt werden. Die einzelnen Instandsetzungslösungen sollen möglichst bis hin zu Pilotprojektebene realisiert und begleitet werden.

Neben theoretischen Betrachtungen sowie Untersuchungen im Labor- und Bauteilmaßstab soll im Rahmen eines Pilotprojekts (Schleuse Schwabenheim, Neckar) eine komplette Grundinstandsetzung und Verlängerung einer Schleuse unter Betrieb durchgeführt werden. Die Instandsetzung soll alle wesentlichen Bauwerkelemente (Kammerwände, Sohle, Häupter, Stahlwasserbau, Einbauteile) umfassen. Auf diese Weise sollen ein grundsätzlicher Nachweis der Machbarkeit einer Instandsetzung unter Betrieb erfolgen und etwaige Schwierigkeiten bei der baulichen Umsetzung identifiziert werden. Die für das Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim zu entwickelnden Instandsetzungslösungen sollen in das zu erstellende Baukastensystem integriert werden.

Vor diesem Hintergrund wird das FuE-Vorhaben in zwei Teile gegliedert:

- Teil A: Erarbeitung modularer Lösungsansätze für die Instandsetzung von Einkammerschleusenanlagen unter Betrieb
- Teil B: Erarbeitung von Lösungsansätzen für die Instandsetzung der Schleuse Schwabenheim/linke Kammer unter Betrieb; Begleitung des Pilotprojekts

Für die Bearbeitung von Teil B soll eine Verknüpfung dieses Projektes mit dem WSV-Projekt „Grundinstandsetzung und Schleusenverlängerung Schleuse Schwabenheim“ des Amt für Neckarausbau Heidelberg (ANH) unter Nutzung der hierfür verfügbaren Ingenieurbürokapazitäten erfolgen.

Um sicherzustellen, dass neben den theoretischen und praktischen Erfahrungen der BAW in den Bereichen Bautechnik, Geotechnik und Wasserbau auch die Erfahrungen der WSV im Bereich der Grundinstandsetzung bestehender Schleusen in die Untersuchungen einfließen, soll das Gesamtvorhaben in Kooperation zwischen der BAW und dem Amt für Neckarausbau Heidelberg (ANH) als Neubauamt mit ausgeprägten Erfahrungen in der Instandsetzung von Schleusen durchgeführt werden. Das in allen Phasen des Projektes in besonderer Weise erforderliche baubetriebliche Wissen soll firmenneutral über eine Kooperation mit dem Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) eingeholt werden. Die Bearbeitung des Gesamtvorhabens soll im Rahmen einer Projektgruppe mit Mitarbeitern aus BAW, ANH und KIT erfolgen.

### 3 Ergebnisse

#### Teil A:

Die Sachstandsberichte „Partielle Trockenlegung von Schleusenammern in nächtlichen Sperrpau- sen“, „Prinzipielle Lösungen zur temporären Trockenlegung von Schleusenammern“ und Austausch eines Stemmtors (Variante 1: nur bewegliche Teile; Variante 2: bewegliche Teile und Betoneinbautei- le) liegen vor. Die Ausarbeitungen haben das Niveau von Machbarkeitsstudien. Die an den Einkam- merschleusen der WSV gegebenen Randbedingungen (Bauweisen, Hubhöhen, Altbetonsituation etc.) wurden analysiert. Auf dieser Basis soll in einem nächsten Schritt festgelegt werden, für welche Ge- gebenheiten vorrangig Instandsetzungslösungen unter Betrieb zu entwickeln sind.

#### Teil B:

Für die Instandsetzung der Kammerwände und der Häupter der Schleuse Schwabenheim wurde eine Variantenuntersuchung durchgeführt. Die Ausarbeitungen haben das Niveau von Machbarkeitsstu- dien, in Teilen das Niveau einer Entwurfsplanung. Der abschließende Bericht wird derzeit von den beteiligten Ingenieurbüros erstellt. Insbesondere für die Instandsetzung bzw. den Ersatzneubau der Schleusenhäupter und für die Schleusenammernverlängerung unter Betrieb wird mittlerweile seitens der Projektgruppe eine frühzeitige Einbindung der Bauindustrie als unverzichtbar angesehen. In 2015 wurden zusammen mit GDWS und BMVI umfangreiche Aktivitäten mit dem Ziel der frühzeitigen Ein- bindung der Bauindustrie über einen wettbewerblichen Dialog vorgenommen.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016: Konzeption Instandsetzung Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim

Erarbeitung weiterer Instandsetzungslösungen (außer Schleuse Schwabenheim)

2017: Begleitung Ausführungsplanung/Ausschreibung Pilotprojekt Instandsetzung Schleuse Schwa- benheim

Erarbeitung weiterer Instandsetzungslösungen (außer Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim)

Nach Möglichkeit Realisierung weiterer Pilotprojekte

2018: Begleitung Ausführung Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim (Beginn)

Erarbeitung weiterer Instandsetzungslösungen (außer Pilotprojekt Schleuse Schwabenheim)

Nach Möglichkeit Realisierung weiterer Pilotprojekte

2019: Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2019.

*Anmerkung: Zeitliche Abhängigkeit von der Realisierung des Pilotprojekts Schleuse Schwabenheim*

### 5 Literatur

-/-

### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Energetische Optimierung der WSV-Gebäude**

**Netzplan-Nr.:** A39510470001

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. D. Erndwein, Abteilung Bautechnik, Referat Konstruktive Gestaltung (B4)

**E-Mail:** daniel.erndwein@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Gebäude sind im Mittel zu 40 % am Energieverbrauch und an der CO<sub>2</sub>-Belastung beteiligt, weshalb hier das größte Einsparpotential gesehen wird. Der Energieverbrauch der WSV-Gebäude wird bisher noch unzureichend erfasst. Eine zentrale Erfassung der Energieverbrauchsdaten in einem Energiemanagement-System hätte zum Vorteil, dass man über Kennwertbildung (Benchmarking) ineffiziente Gebäude identifizieren könnte. Im nächsten Schritt kann man dann gezielt Maßnahmen einleiten, um die Situation in diesen Gebäuden zu verbessern.

Der Aufbau eines kontinuierlichen Energiemanagement eröffnet auch die Möglichkeit Fehler in der Anlagentechnik oder im Betrieb von Gebäuden aufzudecken. Solche Aufzeichnungen ermöglichen den täglichen Betrieb effizienter zu gestalten, ohne dass man große bauliche Veränderungen am Gebäude vornimmt. Die steigenden Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) und die Vorbildfunktion der Bundesbauten führen dazu, dass die Energiekonzepte immer ganzheitlicher und komplexer werden müssen, so dass hier eine langfristige Planung der Einzelmaßnahmen eine immer größer werdende Bedeutung zukommt. In diesem Energiemanagement-System sollen die Energieverbrauchsdaten für Wärme, Strom, und evtl. Wasser, erfasst und bilanziert werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Ein Energiemanagement-System bietet jederzeit einen Überblick über den Energieverbrauch der einzelnen Gebäude der WSV. Die Daten aus der Datenbank bilden die Grundlage für weitere Änderungen bzw. Sanierungen an den Gebäuden der WSV.

Die Bundesregierung hat sich verpflichtet bis zum Jahr 2020 20 % Energie einzusparen und 20 % der Energieversorgung durch regenerative Energiequellen zu decken. Mit dem Aufbau eines Energiemanagement-System kann die WSV ihren Teil dazu beitragen, damit dieses Ziel erreicht wird.

Größere Energieeffizienz und damit Einsparung von Energie führt auch zu einer Einsparung der laufenden Betriebskosten.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel ist eine Energieverbrauchserfassung aller WSV-Gebäude zu erreichen und die Daten in einer Datenbank aufzubereiten, um ineffiziente Gebäude über Kennzahlen (Benchmarking) identifizieren und gezielt Sanierungsmaßnahmen durchführen zu können.

Es wird ein kleiner Maßnahmenkatalog für die energetische Sanierung von Gebäuden erstellt werden, der bei den einzelnen Sanierungen als Leitfaden verwendet werden kann.

### **2 Untersuchungsmethoden**

In einem ersten Schritt erfolgt eine Analyse des Gebäudebestandes (Energieverbrauchs- und erste gebäudespezifische Daten). Dann werden exemplarisch Gebäude ausgewählt, die mit Energiebedarfsberechnungen genauer analysiert werden. Für diese Gebäude werden Sanierungsvarianten erarbeitet und rechnerisch überprüft, um den Prozess einer Gebäudeoptimierung beispielhaft darzustellen. In einem weiteren Schritt wird ein Gebäudemonitoring installiert, um eine effiziente Betriebsweise der Gebäude auf Dauer sicherzustellen und WSV-weit die Überblicks-Funktion herzustellen.



### 3 Ergebnisse

Zur Analyse des Gebäudebestandes wurde in 2012 ein Energieverbrauchs-Erfassungsbogen entwickelt. Mit Hilfe dieses Bogens wurde eine WSV-weite Abfrage von Gebäude- und Energieverbrauchsdaten durchgeführt. Die Rücklaufquote lag erfreulich hoch bei ca. 90 %. Jedoch wurden lediglich 40 % der Erfassungsbögen vollständig ausgefüllt, so dass nur von diesen ein gesicherter Energieverbrauchskennwert ermittelt werden konnte, der den Anforderungen der EnEV gerecht wird.

Es sind aktuell 349 Gebäude von 150 Außenbezirken/Bauhöfen aus 35 Ämtern erfasst und teilweise analysiert.

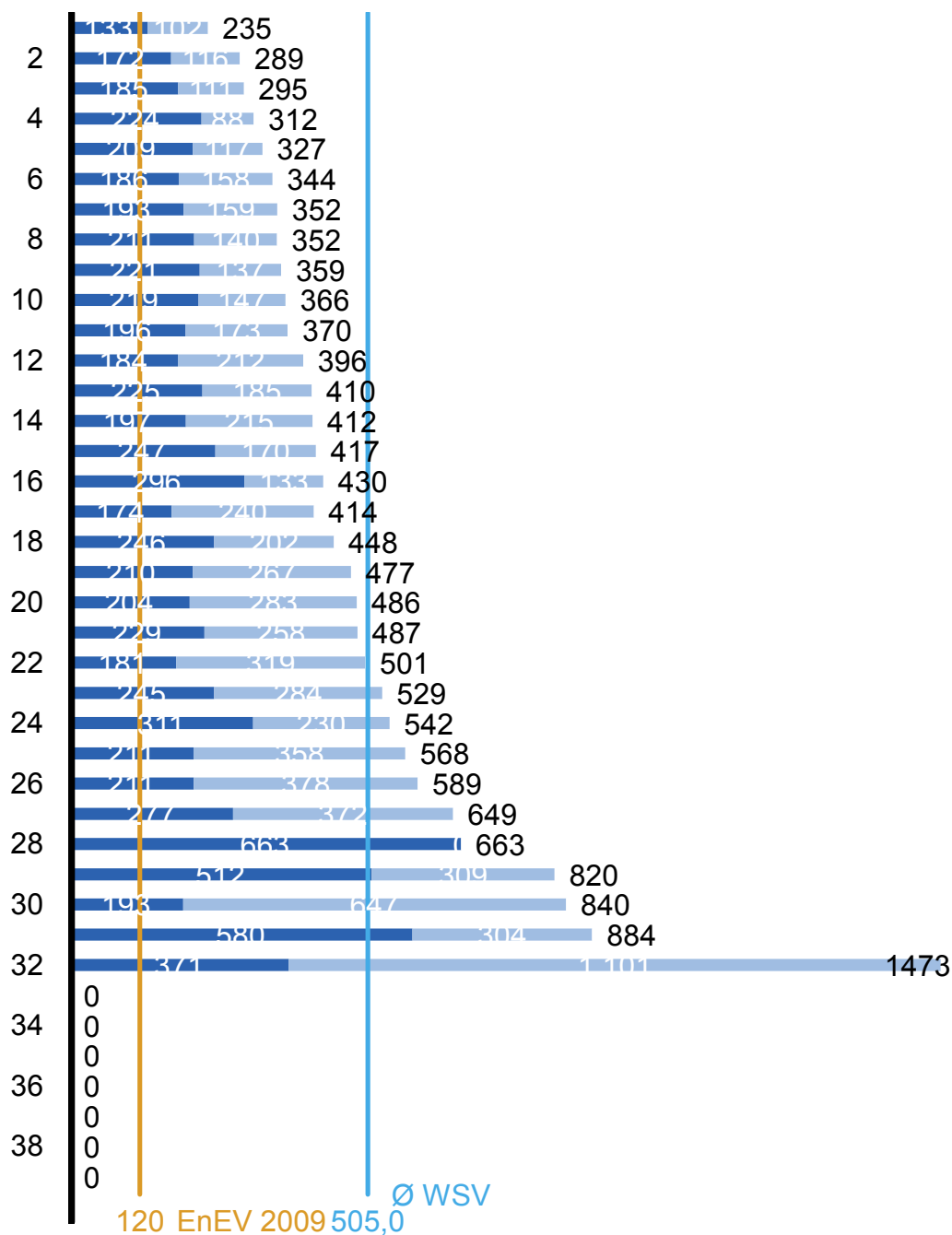


Bild 1: Primärenergieverbrauchskennwerte für Wärme (dunkel) und Strom (hell) der Wasser- und Schifffahrtsämter in kWh/m²a

Bei einem Großteil der erfassten Gebäude ist es oftmals unklar, was von den Zählern genau erfasst wird, weil keine genaue Dokumentation des Bestandes vorhanden ist. Generell lässt sich feststellen, dass die Datengrundlage zu den einzelnen Gebäuden sehr inhomogen ist.

Die erfassten Daten wurden grafisch aufbereitet und als Rückmeldung für die einzelnen Ämter in Kurzberichten zusammengefasst.

Es wurde deutlich, dass es an vielen Stellen an Zählern fehlt, die eine gebäudescharfe Beurteilung der Verbräuche teilweise nicht zulässt. In einigen Energieverbräuchen, vor allem beim Strom, sind Verbraucher (Hafenbeleuchtung, Ladestationen für Schiffe, etc.) enthalten, die nichts mit dem Gebäude zu tun haben.

Ein durchschnittliches Gebäude eines Außenbezirk/Bauhof wurde im Jahr 1968 gebaut und hat eine Fläche von 517 m<sup>2</sup>. Es wird mit einer Gasheizung beheizt, die ca. 15 Jahre alt ist und gleichzeitig für die Warmwasserbereitstellung zuständig ist.

Es wurden Energiebedarfsberechnungen bei Außenbezirken im Bereich der GDWS Aussenstelle West durchgeführt und Ende 2015 abgeschlossen. Die Ergebnisse werden nun analysiert und ausgewertet.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016:

- Entwicklung von beispielhaften Sanierungskonzepten
- Analyse und Bewertung der Sanierungskonzepte
- Zusammenstellung der Ergebnisse

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Bruch- und Verformungsverhalten von rutschgefährdeten Böschungen unter Berücksichtigung des Dreiphasensystems**

**Netzplan-Nr.:** A39520210001

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. R. Schulze, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** roland.schulze@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zur Beurteilung von rutschgefährdeten Böschungen ist die Kenntnis der effektiven Spannungen im Bereich der Scherzone von großer Bedeutung. Hierzu ist eine zutreffende Einschätzung des herrschenden Porenwasserdruckes erforderlich. Die Porenwasserdruckverhältnisse können zeitlich und räumlich stark veränderlich sein. Dies gilt insbesondere in feinkörnigen Böden, die hydraulisch nur gering durchlässig sind.

Als Auslöser von Böschungsrutschungen gilt (auch in bindigen Böden) häufig ein Anstieg der Sickerlinie. In der bisherigen Praxis wurden Messungen fast ausschließlich in offenen Grundwasserbeobachtungsrohren durchgeführt. Da infolge der geringen Durchlässigkeit feinkörniger Böden eine hinreichende Wasserspiegeländerung im Messrohr, wenn überhaupt, nur zeitlich extrem verzögert erfolgen kann, ist dieses Verfahren zur Ermittlung der Wasserdruckverhältnisse in gering durchlässigen Böden ungeeignet. Die Verwendung von Porenwasserdrucksensoren, die in geeigneter Weise (z. B. als geschlossenes System gem. DIN EN ISO 22475-1:2007-01) im Boden eingebaut werden, ist deshalb zur Erfassung der maßgebenden hydraulischen Verhältnisse im bindigen Boden unbedingt erforderlich.

Als theoretischer Unterbau wird das Dreiphasenmodell (bestehend aus Feststoff, Wasser und Gas) angewendet.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Bedeutung dieser Untersuchungen für die WSV besteht darin, dass zahlreiche Problemböschungen an Binnenschiffahrtskanälen mit der o. g. Charakteristik (bindige Böden, unterhalb der Sickerlinie, besondere Beanspruchung durch z. B. Absenk) existieren. Die vorgesehenen Untersuchungen schaffen Voraussetzungen für ein verbessertes grundlegendes Verständnis der maßgebenden mechanischen Modellvorstellung. Auf dieser Grundlage werden wirksame Sanierungskonzepte entwickelt, die eine sinnvolle und wirtschaftliche Sanierung gefährdeter Böschungen ermöglichen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

- Abschätzung des Einflusses der Kompressibilität des Porenwassers auf das Bruch- und Verformungsverhalten von Böschungen
- Sammlung von praktischer Erfahrung mit Porenwasserdrücken in bindigen Böden (Einschätzung der Druckentlastungsgeschwindigkeit, Optimierung der Bemessung der vorgeschlagenen Druckentlastung, Abschätzung saisonaler Einflüsse auf die Porenwasserdruckverteilung usw.)
- Entwicklung geeigneter Laborversuche zur Identifizierung und Ermittlung maßgebender Parameter
- Entwicklung von praxistauglichen und wirtschaftlichen Sanierungsverfahren für rutschungsgefährdete Böschungen

### **2 Untersuchungsmethoden**

Um die Eigenschaften von gering durchlässigen Böden hinreichend zu erfassen, sind geotechnische Feldmessungen (Porenwasserdruck, Verformungen usw.) u. a. an rutschgefährdeten Böschungen erforderlich. Damit soll untersucht werden, welchen Einfluss die Kompressibilität des Porenwassers auf das Bruch- und Verformungsverhalten dieser Böschungen besitzt.

### 3 Ergebnisse

Auf Vorschlag der BAW wurde in zwei Messprofilen bei SKH-km 2,95 bzw. 3,55 die Standsicherheit der Einschnittsböschungen erhöht, indem durch gezielte Druckentlastung durch 2001/2002 hergestellte Bohrungen die Möglichkeit zum Porenwasserdruckabbau geschaffen wurde. Die zeitliche Veränderung der Porenwasserdruckverteilung sowie die Verschiebungen der Böschungen werden seither im Rahmen einer Eignungsprüfung gemessen. Die Bohrungen entlasten im Endzustand mindestens entsprechend einem Potenzial, das durch die geodätische Ansatzhöhe der Druckentlastungsbohrungen maßgebend beeinflusst wird. Grundlegende Voraussagen zur Porenwasserdruckentwicklung, die auf der Anwendung des Dreiphasenmodells basieren, konnten somit messtechnisch verifiziert werden.

Die Standsicherheit der Böschung wurde wesentlich verbessert und die Rutschungsgeschwindigkeit um rund 85 % vermindert. Durch den Einbau von Druckentlastungsbohrungen konnte bereichsweise eine aufwändige Abflachung der Böschung vermieden werden.

Um den Einfluss witterungsbedingter Randbedingungen zu minimieren, wurden ergänzend im Tonbergwerk Klingenberg/Main in einem Probestollen Porenwasserdruckmessungen durchgeführt. Mit diesen Messungen, die dort seit 2005 durchgeführt wurden, soll die Ausbreitung von Porenwasserdruckänderungen in einem relativ homogenen und sehr gering durchlässigen Bodenmaterial messtechnisch erfasst werden. Im Laufe der Jahre zeigte sich, dass Auswirkungen im Zusammenhang mit der Herstellung des Probestollens die Porenwasserdruckentwicklung maßgebend beeinflussen. Einzelheiten sind in Schulze (2011) beschrieben. Darin werden u. a. Schlussfolgerungen gezogen, die neue Perspektiven zum Bruch- und Verformungsverhalten von Tonböschungen eröffnen, wobei Anwendungsgrenzen der in Abschnitt 1.1 genannten Kontinuumsmodelle überschritten werden. Die im o. g. Aufsatz beschriebenen Beobachtungen zu plötzlichen Veränderungen der Materialeigenschaften des Tongebirges können konzeptionell auch zur Abschätzung der zeitabhängigen Standsicherheit von Einschnittsböschungen in überkonsolidiertem Ton verwendet werden.

In Klingenberg wurden die letzten Messungen planmäßig Ende 2011 durchgeführt, bevor im Zusammenhang mit der Betriebsschließung des Tonbergwerks der Probestollen endgültig versiegelt wurde. Grundlegende Ergebnisse des Forschungsprojektes sind auch in den Beitrag Schulze & Stelzer (2015) zur zweiten Deutschen Bodenmechanik Tagung eingeflossen.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Auf Grund der Erstellung eines o. g. umfangreichen Beitrags inkl. dazugehöriger Präsentation (Schulze & Stelzer (2015)) sowie aus organisatorischen Gründen muss die Beendigung des FuE-Vorhabens auf 2016 verschoben werden.

Laufzeit des Vorhabens: 1999 bis 2016.

### 5 Literatur

-/-

### 6 Veröffentlichungen

- Köhler, H.-J., Schulze, R., Feddersen, I. (1999): Influence of barometric pressure changes on slope stability – measurements and geotechnical interpretations. In: Proc. 5<sup>th</sup> International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics (FMGM), Singapore, Balkema, Rotterdam.
- Köhler, H.-J., Schulze, R. (2000): Landslides Triggered in Clayey Soils – Geotechnical Measurements and Calculations. In: Bromhead et. al. (Hrsg.), Landslides in research, theory and practice - Proc. 8<sup>th</sup> Intl. Symp. on Landslides, Cardiff, Telford, London.
- Köhler, H.-J., Schulze, R., Asami, K. (2002): Protection measures in order to increase safety of unstable clay slopes by unconventional pore pressure release techniques. In: Rybář et al. (Hrsg.), Landslides - Proc. 1st Europ. Conf. on Landslides, Prag, Balkema, Lisse S. 597-601.

- Köhler, H.-J., Schulze, R. (2006): Sicherung instabiler Einschnitts- und Deichböschungen mittels Druck-entlastungsbohrungen – Berücksichtigung des Bodens unter Wasser als Dreiphasenmedium. In: Herrmann et al. (Hrsg.), Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen - Handbuch für Theorie und Praxis, Vol. II, Universität Siegen, Eigenverlag Institut für Geotechnik, S. 305-324.
- Köhler, H.-J., Schulze, R. (2009): Stabilisierung von Einschnittsböschungen mittels Wasserdruckentlastung im stationären und instationären Strömungszustand. 24. Christian Veder Kolloquium, Technische Universität Graz, Heft 35, ISBN 978-3-900484-52-1, S. 295-312.
- Schulze, R., Köhler, H.-J. (2003): Stabilisation of endangered clay slopes by unconventional pore pressure release technique. In: Myrvoll (Hrsg.), Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics (FMGM), Oslo, Balkema, Lisse, S. 347-353.
- Schulze, R., Köhler, H.-J. (2003): Increasing safety of unstable slopes by unconventional pore pressure release technique. In: Nataf et al. (Hrsg.), Proc. 1<sup>st</sup> GeoTechnical Measurements and Modelling (GTMM), Karlsruhe, Balkema, Lisse, S. 245-251.
- Schulze, R., Köhler, H.-J. (2004): Sicherung einer instabilen Böschung mittels Druckentlastungsbohrungen – Berücksichtigung des Bodens unter Wasser als Dreiphasenmedium. In: Tagungsband - Messen in der Geotechnik, Braunschweig, IGB-TUBS, Heft 77, ISBN 3-927 610-68-2, S. 349-370.
- Schulze, R. (2010): Bruch- und Verformungsverhalten von rutschgefährdeten Böschungen unter Berücksichtigung des Dreiphasensystems. Beitrag zum BAW-Kolloquium FuE im Binnenverkehrswasserbau, Karlsruhe, Tagungsband im Eigenverlag, S. 38-41.
- Schulze, R. (2011): Pore water pressure effects in clay due to unloading – long-term measurements, change of soil fabric and application. Proc. 8<sup>th</sup> International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics (FMGM), 2011, Berlin
- Schulze, R., Stelzer, O. (2015): Soil modelling considering the influence of gas inclusions in pore water below the piezometric line – a short introduction. In: Schanz/Hettler (Hrsg.): Aktuelle Forschung in der Bodenmechanik 2015, Tagungsband zur 2. Deutsche Bodenmechanik Tagung, Bochum, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-662-45990-4, S. 121-140.
- Schwab, R., Köhler, H.-J., Schulze, R. (2004): Pore water compressibility and soil behaviour - excavations, slopes and draining effects. In: Proc. Skempton Memorial Conf., London, Thomas Telford, London, ISBN 0 7277 3264 1, S. 1169-1182.

## **Böden unter Stoßbelastung**

**Netzplan-Nr.** A39520210014

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. R. Kauther, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** regina.kauther@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Im laufenden Betrieb der Bundeswasserstraßen kommt es immer wieder zu Anfahrungen von Schiffen auf die Ufer der Wasserstraßen. Die bisher verfügbaren Berechnungsverfahren basieren auf der Annahme eines starren Ufers (z. B. aus Beton). Unter der Voraussetzung eines starren Ufers werden die größt-möglichen Kontaktkräfte zwischen Schiff und Böschung sowie der größtmögliche vertikale Weg (Anhebung) des Schiffes aus dem Wasser berechnet. Die im Bereich der WSV dokumentierten Schadensfälle zeigen jedoch, dass die Schiffe in das Ufer eindringen, so dass die Annahme der starren Böschung nicht als realitätsnah gelten kann. Aufgrund der im Vergleich zur starren Böschung geringeren Kontaktkräfte wird in der Tendenz bei der Anfahrung an eine verformbare Böschung ein längerer horizontaler Bremsweg erwartet, so dass die vorhandenen Berechnungsverfahren für die Randbedingungen der verformbare Böschung erweitert werden müssen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Obwohl die Schäden am Schiff und an den Ufern meist ohne längere Unterbrechungen des Betriebs behoben werden können, ist es für die Einschätzung von Gefahrensituationen einerseits und die Dimensionierung von Schutzbauwerken andererseits von zentralem Interesse, die Bremswege und Kontaktkräfte zwischen Schiff und Ufer wirklichkeitsnah prognostizieren zu können. Solche geböschten Schutzbauwerke aus Bodenmaterial haben bisher insbesondere bei temporären Baugruben in Kanälen und Flüssen ihre Anwendung gefunden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

In Rahmen des Forschungsvorhabens wird das Eindringverhalten von typischen Binnenschiffen in Böschungskörper aus nicht kohäsivem Bodenmaterial untersucht. Das Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung von Prognoseverfahren für den Bremsweg und die Kontaktkräfte zwischen Schiff und Boden. Als Eingangsgrößen für die Prognoseverfahren sollen die bekannten Schiffsparameter Anfahrtgeschwindigkeit und Tiefgang des Schiffes sowie die Böschungsgeometrie (Neigung und Höhe der Böschung) verwendet werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Als Untersuchungsmethodik wurde die bodenmechanische Modellversuchstechnik angewandt. Die Versuche wurden in den Modellmaßstäben 1:75, 1:23 und 1:17,8 ausgeführt. Zur Erfassung der Einflüsse aus den hydromechanischen und -dynamischen Randbedingungen auf den Stoßvorgang und zur Messung der Porenwasserdrücke im Boden während des Stoßvorganges wurden zusätzlich drei Naturversuche durchgeführt.

### **3 Ergebnisse**

Zur Berechnung des Bremswegs wurden von Kauther und Schuppener (2008) in Abhängigkeit des Schiffbugtyps bodenmechanische Berechnungsmodelle entwickelt, mit denen die Eindringung der Schiffe in die Uferböschung und die dabei auftretenden Kontaktkräfte ermittelt werden können. Da die Auswertung der Modell- und der Naturversuche gezeigt hat, dass Trägheitskräfte nur zu Beginn des Schiffsstoßes eine relevante Größe besitzen und auf die Länge des Bremswegs deshalb nur einen untergeordneten Einfluss haben, genügen zunächst Modelle, bei denen der Schiffsstoß als quasistatischer Vorgang abgebildet wird. Die Bremswegberechnung beruht auf dem Energieerhaltungssatz der Mechanik und bilanziert die kinetische Energie des Schiffes zu Beginn des Bremsvorgangs mit der Deformationsarbeit längs des Bremswegs und der Potentiellen Energie durch die Anhebung des

Schiffes. Die Auswertung der Modellversuche zeigt, dass während des Bremsvorgangs von einer Mobilisierung des Grenzzustandes des passiven Erddrucks im Boden vor der Bugwand ausgegangen werden kann. Die Größe des passiven Erddrucks ist von der Größe und der Neigung der Wandfläche, die mit dem Boden in Kontakt ist sowie von der Lage der Kontaktfläche in der Böschung (Neigung der Böschung oberhalb der Kontaktfläche und Abstand der Kontaktfläche zur Geländeoberkante) beeinflusst. Da sich das Schiff weiterbewegt bis die kinetische Anfangsenergie transformiert ist, wird davon ausgegangen, dass im Boden fortlaufend neue Bruchkörper entstehen. Dies konnte sowohl anhand von Messungen als auch von Videoaufnahmen eines unter statischen Bedingungen ausgeführten Versuches mit dem Spitzbugschiff Gerda verifiziert werden. Die in unbekannter Verteilung zwischen Bug und Boden wirkenden Kontaktspannungen werden für die Berechnung der Energiebilanz zu einer resultierenden Kraft zusammengefasst. Der Angriffspunkt der Kraft ändert sich ebenfalls mit der Veränderung der Lage und der Größe der Kontaktfläche. Außer den Kräften aus dem Erdwiderstand wird die Änderung der Auftriebskraft bei der Anhebung des Schiffes berücksichtigt.

Für die Berechnung der Länge des Bremswegs und der Kontaktkräfte müssen die Bodenparameter Wichte, Reibungswinkel und Wandreibungswinkel zwischen Bug und Böschung bekannt sein. Weitere Eingabeparameter sind die Anfahrtschwindigkeit des Schiffes, die Masse und der Tiefgang sowie die Geometrie des Buges und der Böschung (Böschungshöhe und Neigung).

Da der Verlauf des Bremswegs nicht von vorneherein bekannt ist, wird das Berechnungsverfahren inkrementell formuliert. Die wichtigsten Schritte des Berechnungsverfahrens sind:

- Berechnung der Größe und Lage der Kontaktfläche in Abhängigkeit einer vorgegebenen inkrementellen Drehung  $\Delta\psi$  des Schiffes innerhalb jeden Weginkrements  $\Delta x$
- Berechnung der vertikalen Differenzkraft aus Schiffsgewicht und Auftrieb in Abhängigkeit der Schiffposition (Anhebung des Schiffes aus dem Wasser)
- Berechnung des passiven Erddrucks auf die ermittelte Kontaktfläche
- Ermittlung der im Weginkrement maximal möglichen Anhebung des Schwerpunkts  $\Delta z_s$  mit Hilfe der Bedingung, dass die vertikale Auflagerkraft nicht größer als die vertikale Komponente des Erdwiderstands sein kann
- Berechnung der Deformationsarbeit im Boden, der Potentiellen Energie und der verbleibenden kinetischen Energie. Das Schiff kommt zum Stillstand, wenn die kinetische Energie vollständig transformiert ist

Anhand der Validierung des Berechnungsverfahrens konnte gezeigt werden, dass sowohl der Verlauf des Bremswegs als auch die Länge und die Größe der Kontaktkräfte für das Pontonbugschiff in sehr guter Übereinstimmung mit den Messwerten ermittelt werden können. Für eine Anwendung des Berechnungsverfahrens auf den Bremsvorgang des Spitzbugschiffs musste das Verfahren in folgenden Punkten erweitert werden:

- Berücksichtigung der Breitenentwicklung des Buges:  
Da beim Spitzbugschiff im Gegensatz zum Pontonbugschiff keine konstante Breite des Buges angenommen werden kann, muss bei der Berechnung des passiven Erddrucks die Breitenentwicklung des Buges in Abhängigkeit der Eindringung des Schiffes in die Böschung und der Lage der Kontaktfläche auf dem Bug bestimmt werden. Dazu werden die entsprechenden Spantenpläne der Spitzbugschiffe verwendet.
- Berücksichtigung einer Sohlreibung als zusätzliche bremsende Kraft:  
Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass das Spitzbugschiff im Vergleich zum Pontonbugschiff bei gleicher Geschwindigkeit einen längeren Bremsweg besitzt, womit es auch tiefer in die Böschung eindringt. Deshalb kann zusätzlich zum frontal auf das Schiff wirkenden passiven Erddruck eine Reibungskraft zwischen Schiffssohle und Boden berücksichtigt werden. Für die Erweiterung des Rechenmodells um diesen Einfluss, ist neben dem Coulomb'schen Reibungsbeiwert Schiffsstahl/Boden auch die Kenntnis der Größe der auf die Schiffssohle wirkenden Kontaktnormalkraft erforderlich. Diese wiederum bestimmt sich aus der Reaktion und der Größe des beteiligten Bodenbereiches unter dem Schiff. Aus den durchgeführten Experimenten war bekannt, dass unterhalb der Schiffssohle kein klassischer Grundbruch („general shear failure“) stattgefunden hat, sondern vielmehr der Boden unter der Auflast des Schiffes überwiegend zusammengedrückt wird. Eine solche Reaktion kann durch

das Versagensmodell des „local shear failure“ (Terzaghi, 1943) erfasst werden. Der mobilisierbare Bodenwiderstand ist bei diesem Versagensmodell kleiner im Vergleich zum „general shear“-Versagen

Mit dem für das Spitzbugschiff erweiterten Berechnungsverfahren wurden auch die drei Naturversuche nachgerechnet. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messungen. Einflüsse, die beim Modellversuch ausgeschlossen waren, wie z. B. das mit dem Schiff mitbewegte Wasserwellensystem und die Elastizität des Schiffes, haben sich auch beim Naturversuch als nicht relevant herausgestellt. Untersuchungen von Kramer (2008) zum Einfluss des Porenwassers in der Böschung ergaben, dass der in den Naturversuchen gemessene Porenwasserüberdruck bei der Bremswegberechnung vernachlässigt werden kann. Für die Berechnung des Erdwiderstandes genügt ein Ansatz der Auftriebswichte für den wassergesättigten Bodenbereich. Diese Erkenntnis konnte auch mit dem von der BAW aufgestellten Berechnungsverfahren (Kauther, 2007) bestätigt werden. Das Ergebnis erstaunt insofern, als dass in experimentellen Untersuchungen von Ottensen Hansen et al. (1995) große Unterschiede für den Bodenwiderstand auf das Schiff für trockenen im Vergleich zu wassergesättigtem Sand festgestellt wurden. Dabei wurden für den wassergesättigten Sand 10- bis 20-fach größere Reaktionskräfte gemessen. Auf der Suche nach einer Erklärung führten Ottensen Hansen und Gislason (2007) Kegelfallversuche in trockene und wassergesättigte Sande aus. Eine Erklärung für die hier bis zu 70-fach größeren Reaktionskräfte wurde im Auftreten von Porenwasserunterdrücken (Saugspannungen) bis hin zur Kavitationsgrenze gefunden. Eine kritische Analyse der Versuche ergab, dass dieser Effekt jedoch nur bei sehr dichten Sanden in Kombination mit hohen Eindringgeschwindigkeiten auftritt. Bei den unter Zwangsführung durchgeführten Schiffsstoßversuchen (Ottensen Hansen et al., 1995) kommen vermutlich auch noch Einflüsse aus dem Versuchsaufbau hinzu. Bei den von der BAW durchgeführten Naturversuchen wurde die Böschung aus Kiessand greiferweise unter Wasser hergestellt. Hierbei kann höchstens von einer mitteldichten Lagerung ausgegangen werden, wahrscheinlich lag aber sogar nur eine lockere Lagerung vor. In der Folge traten bei den Naturversuchen keine Porenwasserunterdrücke sondern Porenwasserüberdrücke auf, die jedoch den Verlauf und die Länge des Bremsweges nicht relevant beeinflussten. Für die Dimensionierung von Schutzböschungen in der verkehrswasserbaulichen Praxis bedeutet dies, dass auf den Ansatz eines erhöhten Bodenwiderstandes verzichtet werden soll, wenn nicht eindeutige Hinweise dafür vorliegen, dass sich Saugspannungen während des Bremsvorgangs im Untergrund entwickeln können.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Abschließend wird im Jahr 2016 der Bremsweg in der dynamischen Phase untersucht. Die Beendigung des Forschungsvorhabens mit der Erstellung des Abschlussberichts ist in 2017 vorgesehen.

Laufzeit des Vorhabens: 1997 bis 2017 (beantragt).

#### 5 Literatur

- Kramer, H. (2008): Schiffsstoß auf Uferböschungen, Naturversuche mit Gerda, Bremswegberechnung, Ingenieurbüro Kramer&Albrecht, Hamburg, Dezember 2008
- Ottensen Hansen, N.-E., Simonsen, B.C., Sterndorff, M.J. (1995): Soil Mechanics of Ship Beaching in Kim, H. (HG.): Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, Seoul, South Korea
- Ottensen Hansen, N.-E., Gislason, K. (2007): Soil Reactions in Saturated Sand Caused by Impulsive Loads, Journal of Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering, Volume 133, January/February 2007, S. 39-49
- Terzaghi, K. (1943): Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc. New York



## 6 Veröffentlichungen

- Kauther R., Schuppener, B. (2007): Physical Modelling of Ship Collisions with Embankments of Waterways, 4<sup>th</sup> International Conference on Collision and Grounding of Ships, ICCGS 2007, Hamburg, Germany
- Kauther, R., Schuppener, B. (2008): Ship collision with waterway embankments - a proposal for the calculation of the stopping distance and the contact forces, 11<sup>th</sup> Baltic Sea Geotechnical Conference, September 2008, Danzig, Poland

## Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken

Netzplan-Nr.: A39520210045

Projektleiterin: Dipl.-Ing. K. Bergholz, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

E-Mail: katharina.bergholz@baw.de

### 1 Problemstellung und Ziel

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Nichtbindige Böden zeigen infolge zyklischer Belastung eine bedeutende Akkumulation plastischer Verformungen. Dies kann sowohl in Laborexperimenten als auch bei Setzungsmessungen wechselbeanspruchter Bauwerke beobachtet werden. Insbesondere bei Schleusen, die in der Regel eine sehr hohe Lastamplitude aufweisen, können beachtliche Langzeitsetzungen verzeichnet werden (Bild 1). Sind diese Langzeitsetzungen nicht schon in der Planungsphase hinreichend genau bekannt, können sie zu erheblichen Bauwerksschäden führen.

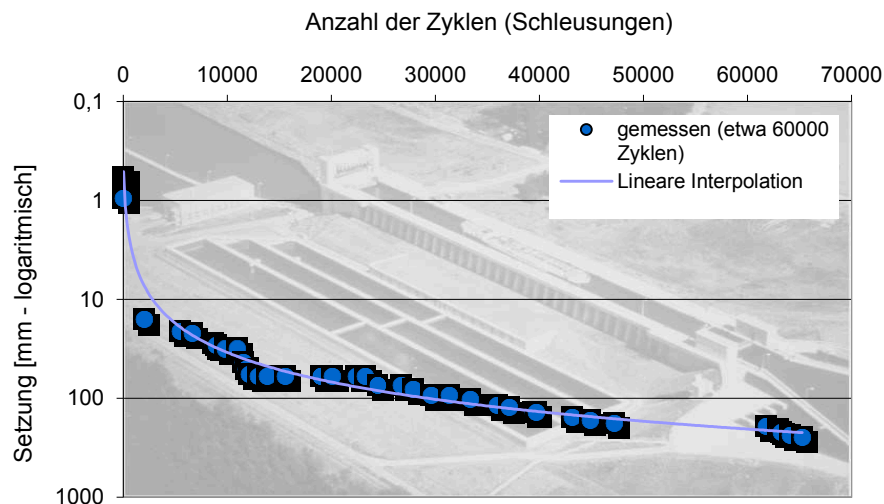


Bild 1: Setzungen der Schleuse Uelzen I als Funktion der Lastzyklen (= Schleusungen)

Mit den derzeit verfügbaren elasto-plastischen sowie den inkrementell formulierten Stoffgesetzen (z.B. Hypoplastizität) können Langzeitsetzungen mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) nur unzulänglich abgebildet werden. Zudem erfordert eine hohe Anzahl von Lastzyklen bei diesen Modellen eine sehr hohe Rechenleistung, da jeder Lastzyklus einzeln berechnet werden muss. Pseudoviskose Stoffgesetze, bei denen die Lastzyklen als Zeit (Pseudozeit) ausgedrückt werden, verursachen hingegen einen relativ geringen Rechenaufwand. Diese Stoffgesetze sind jedoch empirisch und daher schwer zu bewerten.

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Sowohl zur Vermeidung von Bauwerksschäden als auch für die wirtschaftliche Bemessung einzelner Bauteile ist eine gute Abschätzung der zu erwartenden Langzeitsetzungen unbedingt erforderlich; so ist z. B. die Wahl der einzubauenden Fugenbänder direkt von der Bauwerkssetzung abhängig.

#### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Stoffgesetzes, das es erlaubt, Langzeitsetzungen von Schleusenbauwerken hinreichend genau zu berechnen. In einem Finite-Elemente-Programm (ABAQUS/PLAXIS) implementiert, soll das Rechenmodell in der Lage sein, viele tausend Lastzyklen bei akzeptablem Rechenaufwand abzubilden.

Abschließende Empfehlungen für die Praxis sollen basierend auf den Untersuchungsergebnissen erarbeitet werden.

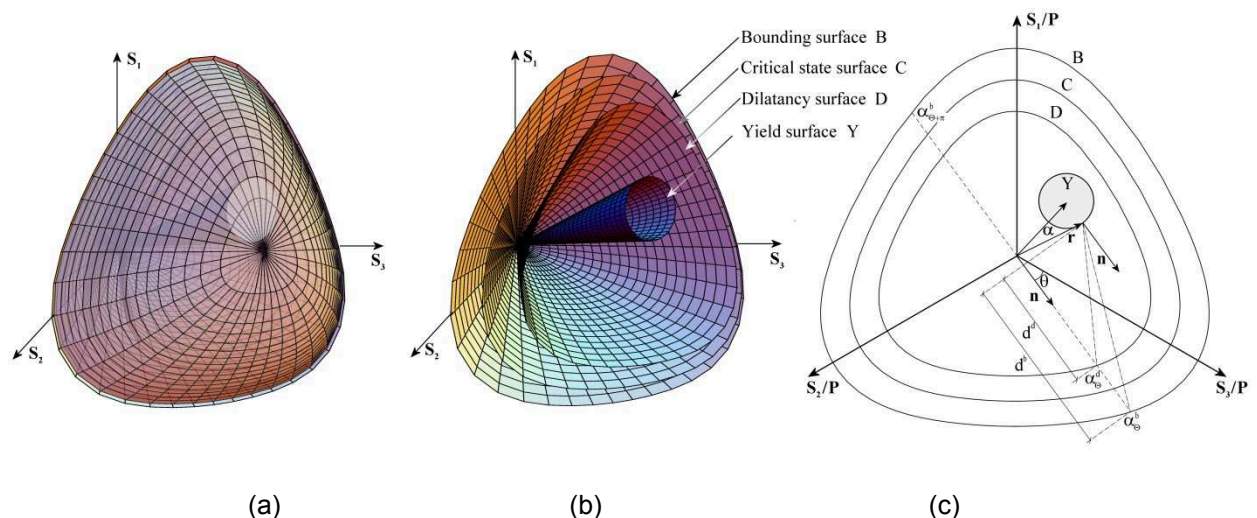
## 2 Untersuchungsmethoden

Numerische Modellrechnungen, Laborversuche, Vergleich mit Langzeitmessungen.

## 3 Ergebnisse

Das aus der Forschungsarbeit von 2002-2004 resultierende elasto-plastische Stoffgesetz aus der Klasse der Bounding-Surface-Modelle (Forschungsbericht 2004) wurde in den Jahren 2005 und 2006 den Bedürfnissen praktischer Anwendungen weiter angenähert. Ein iterativer Algorithmus zur Konvertierung allgemein verwendeter bodenmechanischer Kenngrößen in einen Teil der im Modell intern verwendeten Parameter wurde erarbeitet und erprobt. Ein modifiziertes Modell ohne isotrope Verfestigung der Fließfläche wurde implementiert. Ohne isotrope Verfestigung wurde es möglich, den Bereich kleiner Dehnungen über die Steifigkeit innerhalb des elastischen Bereiches direkt zu definieren, was eine weitere Modellvereinfachung darstellt.

Die Struktur des vereinfachten Modells besteht weiterhin aus den in Bild 2 dargestellten Komponenten. Die Kappe des Modells wurde identisch zur Kappe des Hardening-Soil-Modells gewählt. Zusätzlich enthält das Modell eine isotrope Erinnerungsfläche für die maximal aufgebrachte deviatorische Dehnung (in Bild 2 nicht dargestellt). Das vereinfachte Modell wurde für triaxiale Bedingungen getestet. Konvergenzprobleme wurden bei sehr kleinen mittleren Spannungen erkannt.



**Bild 2:** Das verwendete Bounding-Surface-Modell im Hauptspannungsraum dargestellt:  
(a) Kappe – nur der hervorgehobene Bereich der Kappe ist aktiv;  
(b) Grenzflächen des Modells; (c) Projektionsregeln.

Im Jahr 2013 wurde die Bearbeitung des Forschungsprojektes mit neuen Personalressourcen wieder aufgenommen. Nach einer Einarbeitungsphase stand die Verbesserung des Konvertierungsalgorithmus zur Ermittlung der internen Modellparameter im Mittelpunkt der Entwicklungsarbeit, die auch 2014 weitergeführt wurde. Die Anzahl der iterativ zu bestimmenden Parameter wurde erhöht und mit Hilfe eines neuen Optimierungsalgorithmus die Zuverlässigkeit und numerische Stabilität der Routine deutlich verbessert.

Anhand von Labordaten wurden Parametersätze für verschiedene Sande kalibriert und zahlreiche Elementversuche zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Stoffgesetzes simuliert (Oedometer-, isotrope Kompressions-, drainierte/undrainierte Triaxialversuche). Dabei wurde die Dilatanzformulierung des ursprünglichen Materialmodells als eine wichtige Ursache für die zu beobachtende Überschätzung des initialen kontraktanten Verhaltens und andere Defizite im volumetrischen Verformungsverhalten identifiziert und daher deren Modifizierung in den Fokus gerückt. Die Eignung verschiedener

alternativer Modellierungsansätze, insbesondere aus der Literatur, wurde untersucht. Desweiteren wurde auch die Formulierung des Verfestigungsgesetzes genauer beleuchtet und durch die Einbeziehung zusätzlicher Zustandsabhängigkeiten im Hinblick auf eine bessere Abbildung experimenteller Daten modifiziert.

Im Zuge der Überarbeitung von Dilatanz- und Verfestigungsmechanismen zeigte sich außerdem, dass das Zusammenwirken von Kappe (Bild 2(a)) und konusförmiger Fließfläche („Konus“ bzw. „Yield surface F“ in Bild 2(b)) einer belastungs- bzw. dehnungsrichtungsabhängigen Steuerung bedarf, um sowohl triaxiale als auch oedometrische bzw. isotrope Spannungspfade mit dem gleichen Parametersatz abbilden zu können. Neben dem bestehenden Zwei-Fließflächen-Modell (Kappe und Konus) wurde in diesem Zusammenhang auch ein mathematisch geschlossener Ansatz für eine zusammenhängende Fließfläche implementiert und getestet.

Zusätzlich zur ursprünglichen Implementierung mit implizitem Integrationsalgorithmus wurde ein explizites Modell mit Runge-Kutta-Integrationsschema geschaffen, welches aufgrund des geringeren Rechenaufwands je Zeitschritt im Hinblick auf die Entwicklungsarbeit leichter handhabbar ist.

Zusammenfassung der im Projekt bislang erzielten Ergebnisse:

- Numerische Umsetzung eines Bounding-Surface-Modells; erste erfolgreiche Nachrechnung von Laborversuchen, erste Nachrechnung des Setzungsverlaufs der Schleuse Uelzen
- Implementierung eines Algorithmus zum Überspringen von Zyklen
- Entwicklung eines neuen Modellierungsansatzes für den Bereich kleiner Dehnungen
- (HS-Small Modell – im FE Programmsystem PLAXIS verfügbar)

Diese Ergebnisse wurden von Vermeer et al. (2006), Benz (2007) und Benz et al. (2007, 2009) in internationalen und nationalen Fachzeitschriften veröffentlicht.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Die jüngere Entwicklungsarbeit hat gezeigt, dass es noch bestimmter Modifikationen bedarf, um mit Hilfe des vorliegenden Bounding-Surface-Modells wichtige Eigenschaften des Bodens realitätsnah abzubilden, welche wiederum als Voraussetzung für die erfolgreiche Simulation zyklischen Tragverhaltens und anderer baupraktisch relevanter Belastungssituationen angesehen werden. Vor der Implementierung eines speziellen Mechanismus zur Erfassung sich akkumulierender Dehnungen ist daher vorgesehen, bestehende Modellkomponenten (Dilatanzformulierung, Verfestigungsgesetz, Small-Strain-Mechanismus) abschließend zu optimieren. Die Validierung des Modells erfolgt im Anschluss mit Hilfe von vorhandenen Laborversuchsdaten und In-situ-Langzeitmessungen. Anhand von systematischen Nachrechnungen elementarer und komplexer Spannungspfade sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Stoffgesetzes aufgezeigt werden. Letztendlich soll ein Stoffmodell für baupraktische Anwendungen einschließlich einer umfassenden Dokumentation der Funktionsweise und Anwendungsgrenzen bereitgestellt werden.

Laufzeit des Vorhabens: 2002 bis 2016.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

- Vermeer, P. A., Schwab, R., Benz, T. (2006): Two Elastoplastic Models for Small and Large Strains and Their Use in Engineering Practice. In: Wu, W., Yu, H. S. (Ed.): Modern Trends in Geomechanics. Springer Berlin, New York, pp. 175-190.
- Benz, T. (2007): Small-Strain Stiffness and its Numerical Consequences. Dissertation. Mitteilung 55 des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart.
- Benz, T., Schwab, R., Vermeer, P. A. (2007): Zur Berücksichtigung nichtlinearer Bodensteifigkeit im Bereich kleiner Dehnungen in geotechnischen Berechnungen. Bautechnik, Band 84, Heft 11, S. 749-761.

- Benz, T., Vermeer, P. A., Schwab, R. (2009): A small-strain overlay model. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Volume 33, Issue 1, pp. 25-44.
- Benz, T., Schwab, R., Vermeer, P. A. (2009): Small-strain stiffness in geotechnical analyses. Bau-technik, Volume 86, Issue Supplement 1, pp. 16-27.

## **Hydraulischer Grundbruch unter unterströmten Bauwerken mit luftseitigen Auflastfilter**

**Netzplan-Nr.:** A39520370001

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Bernhard Odenwald, Abteilung Geotechnik, Referat Grundwasser (G3)

**E-Mail:** bernhard.odenwald@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Auf Grundlage numerischer Grundwasserströmungsberechnungen durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass für Baugruben mit unterströmten, relativ gering in den Untergrund einbindenden Wänden und baugrubenseitigem Auflastfilter der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch gemäß den deutschen, aktuellen geotechnischen Regelwerken keine auf der sicheren Seite liegenden Ergebnisse liefert. Dies ist begründet durch die in diesem Fall signifikanten, vertikalen Strömungsanteile unterhalb des Wandfußes, die in üblichen Berechnungsansätzen nicht berücksichtigt werden. Zur sicheren Dimensionierung des Auflastfilters wurde von der BAW ein auf numerischen Strömungsberechnungen basierendes Verfahren vorgestellt, durch das auch die vertikalen Strömungskräfte unterhalb des Wandfußes sowie zusätzlich Sicherheiten nach DIN 1054 berücksichtigt werden (Odenwald und Herten, 2008).

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Bei Baumaßnahmen an Schifffahrtskanälen werden in zunehmendem Maß tiefe Baugruben unmittelbar neben in Betrieb befindlichen Kanalstrecken erstellt, um den Schifffahrtsbetrieb auch während der Baumaßnahme aufrecht zu erhalten. Um die aus dem Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch resultierende, erforderliche Einbindetiefe der Baugrubenumschließungswände in den Baugrund zu reduzieren, erfolgt die Sicherung gegen hydraulischen Grundbruch oft durch einen Auflastfilter auf der Baugrubensohle. Die Entwicklung eines auf der sicheren Seite liegenden Berechnungsansatzes ist für die WSV von grundlegender Bedeutung für die sichere und wirtschaftliche Durchführung von Baumaßnahmen an Bundeswasserstraßen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung des Versagensmechanismus des hydraulischen Grundbruchs bei luftseitig aufgebrachtem Auflastfilter. Auf Grundlage der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen, die sich aus numerischen Berechnungen und Modelluntersuchungen zusammensetzen, soll der von der BAW entwickelte, vereinfachte Berechnungsansatz (Odenwald und Herten, 2008) validiert und ggf. weiterentwickelt werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Der Fokus liegt auf der Durchführung von Versuchen zur Visualisierung des Bruchvorganges. Zur visuellen Auswertung der Versuche wird die Particle Image Velocimetry (PIV) Method eingesetzt. Ergänzend werden numerischen Berechnungen mittels Diskrete-Elemente-Methode (Particle Flow Code) durchgeführt um die Ergebnisse der Modellversuche zu simulieren.

### **3 Ergebnisse**

Im Auftrag der BAW wurden vom Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Universität der Bundeswehr München ein Versuchsstand zur Visualisierung des Versagens durch hydraulischen Grundbruch bei Unterströmung einer Spundwand erstellt und insgesamt 22 Versuche mit einer umfangreichen messtechnischen Begleitung durchgeführt. Im Rahmen dieser Versuche wurden die Einbindetiefe der Spundwand und die Einbaustärke des Filters variiert. Die Versuche zeigten, dass der zeitliche Ablauf des Versagensprozesses bei den Versuchen mit geringer Filterdicke und denen mit größerer Filterdicke grundsätzlich verschieden ist und belegen somit, dass die Dicke des Filters einen bedeutenden Einfluss auf den Versagensprozess hat. Bei den Versuchen mit geringer Filterschichtdicke zeigten sich deutliche Hebungen in dem der Spundwand vorgelagerten Bereich bereits einige Poten-

zialstufen bevor der eigentliche Bruch eintrat. Bei den Versuchen, die mit großen Filterdicken durchgeführt wurden, trat der Bruch ein bis drei Minuten nach Beobachtung der ersten Hebungen auf. Beispielfhaft sind in Bild 1 die absoluten Bewegungen im Bereich des Spundwandfußes für verschiedene Potentialstufen dargestellt, die mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) Method ausgewertet wurden.

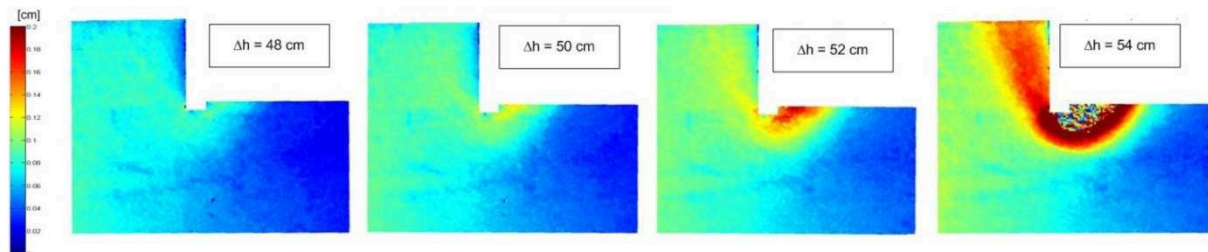


Bild 1: Absolute Bewegungen im Bereich des Spundwandfußes für verschiedene Potentialstufen

Um eine direkte Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsansatzes nach Odenwald und Herten (2008) zu schaffen, wurde der Berechnungsansatz an die Randbedingungen des Modellversuches angepasst. Dabei wurde eine relativ gute qualitative Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Modellversuche und den theoretischen Berechnungen festgestellt. Allerdings ergab sich quantitativ eine deutliche, mit zunehmender Dicke des Auflastfilters wachsende Abweichung. Diese ist auf die Vernachlässigung der Reibungskräfte im theoretischen Berechnungsansatz zurückzuführen.

Zur Modifizierung des Berechnungsansatzes nach Odenwald und Herten (2008) wurden folgende Varianten betrachtet:

- Variante 1: Ersatzkörpergeometrie entsprechend der mittels PIV Methode erfassten Versagenskörpergeometrie und
- Variante 2: Ersatzkörpergeometrie auf Grundlage der Verteilung des kritischen hydraulischen Gradienten  $i_{krit}$ .

Bei beiden Varianten wurden außerdem zusätzlich Reibungskräfte berücksichtigt. Die beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen ergab sich für eine Ersatzkörpergeometrie entsprechend Variante 2.



Bild 2: Versuchsaufbau der Zylinderdurchströmungsversuche

Um die mechanische Wirkung eines Auflastfilters grundlegend zu analysieren, wurden in einem weiteren Schritt vereinfachte, eindimensionale Durchströmungsversuche durchgeführt. Dabei wurde eine zylindrische, mit einem Auflastfilter belastete Bodenprobe vertikal von unten nach oben durchströmt (Bild 2). Verwendet wurden die Böden aus der ersten Versuchsreihe sowie als weitere Abstraktion aus Glaskugeln bestehende Körnungen. Auch bei diesem Versuchsaufbau wurden Porenwasserdrücke, Hebungen des Auflastfilters und der Durchfluss erfasst.

Diese Glaskugelmodellversuche wurde im Auftrag der BAW durch das Institut für Geotechnik, Lehrstuhl Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau der TU Bergakademie Freiberg durch numerische Berechnungen mittels Particle Flow Code (PFC) in Verbindung mit Coupled Computational Fluid Dynamics (CCFD) nachzusimuliert. Die gekoppelten Berechnungen für die hier verwendete Kugelanzahl haben sich als sehr rechenintensiv und störungsempfindlich herausgestellt. Es ist jedoch gelungen die wesentlichen Effekte der Modellversuche (Bewegungen der Kugeln, Verschiebungen von Schichtgrenzen, Versagensmechanismen) durch die numerischen Berechnungen abzubilden. Es konnten aber mit den eingesetzten numerischen Verfahren aufgrund des hohen Rechenaufwands lediglich sehr vereinfachte Modellversuche abgebildet werden. Eine Anwendung dieser numerischen Berechnungen auf Untersuchungen mit komplexeren Strömungsbedingungen ist dagegen derzeit nicht möglich.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die numerischen Simulationen der Zylinderdurchströmungsversuche mittels Particle Flow Code (PFC) und Coupled Computational Fluid Dynamics (CCFD) wurden Ende 2015 abgeschlossen. Nach Einarbeitung der Ergebnisse dieser numerischen Untersuchungen in den Abschlussbericht wird das Forschungsvorhaben in 2016 beendet.

Laufzeit des Vorhabens: 2009 bis 2016.

#### 5 Literatur

Odenwald, B; Herten, M. (2008): Hydraulischer Grundbruch: neue Erkenntnisse, Bautechnik 85/9, S. 585 – 595.

#### 6 Veröffentlichungen

- Boley, C., Schober, P. (2013): Hydraulisch verursachtes Versagen von Baugrubensohlen - hydromechanische Grundlagen und Bemessung, 20. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium
- Boley, C., Schober, P. (2013): Neue Erkenntnisse zum Versagen der Baugrubensohle durch hydraulischen Grundbruch. Beiträge zur 9. Österreichischen Geotechnik-Tagung. Wien, 24./25.01.2013
- Boley, C., Schober, P. (2013): Experimental Analysis on the Influence of Surcharge filters on safety Against Hydraulic Heave, 18. ICSMGE Paris, 02.-06.09.2013
- Schober, P. (2011): Hydraulic Heave at the Excavation Wall with Under-Flow of Small Embedded Depth and Filter Layers at the Excavation Side of the Wall, " Geotechnical Engineering: New Horizons, Proceedings of the 21st European Young Geotechnical Engineers' Conference, Rotterdam
- Schober, P., Boley, C. (2012): Fracture behavior of uniaxial flowed sand column with sur-charge filter, 2nd IAHR Europe Congress TUM, 27.-29.06.2012 Technische Universität München
- Schober, P., Boley, C. (2012): Research on safety the against hydraulic heave for excavation walls with under- flow of small embedded depth and filter layers. 12th Baltic Sea Geotechnical Conference, Proceedings (CD), Rostock, 31.05–02.06.2012, 7 S
- Schober, P., Boley, C., Odenwald, B. (2011): Hydraulic Heave Safety at Excavations with Surcharge Filters. 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR). 02.-03.06 2011, Munich, Germany, S. 677 - 684
- Schober, P., Boley, C., Odenwald, B. (2011): Research on hydraulic heaves at excavations with sur-charge filters. 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE 2011), 12. - 15. September 2011, Athen, Griechenland, S. 575 - 580
- Schober, P., Odenwald, B. (2012): Der Einfluss eines Auflastfilters auf die Bruchmechanik beim hydraulischen Grundbruch, BAWMitteilung, Bd. 95, S. 151 - 162



Schober, P. (2014): Zum hydraulischen Grundbruch an Baugrubenumschließungen bei luftseitiger Sicherung durch einen Auflastfilter in nichtbindigen Böden, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Institut für Bodenmechanik und Grundbau

## Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser

Netzplan-Nr.: A39520370002

Projektleiter: Dr.-Ing. H. Montenegro, Abteilung Geotechnik, Referat Grundwasser (G3)

E-Mail: hector.montenegro@baw.de

### 1 Problemstellung und Ziel

Flussauen werden sowohl durch die Überflutungsdynamik als auch, mitunter bis weit ins Hinterland, durch die Grundwasserdynamik geprägt. Änderungen der Abflussverhältnisse oder des hydraulischen Anschlusses an der Gewässersohle, beispielsweise durch Anpassungsmaßnahmen, wirken somit unmittelbar auf das Grundwasserregime und letztlich auf den Wasserhaushalt der Aue. Eine 2009 erfolgte Deichrückverlegungsmaßnahme an der Elbe im Bereich Lenzen ermöglicht es, den Austausch zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser im Naturmaßstab zu beobachten und derzeit verwendete Modellansätze zur Quantifizierung des Austausches zwischen den Wasserkörpern zu überprüfen.

#### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Austauschprozesse zwischen Oberflächen- und Grundwasser werden in der Regel über großräumige Wasserbilanzen abgeschätzt, da die lokalen Austauschvorgänge messtechnisch sehr schwer zu bestimmen sind. Derzeitige Modellvorstellungen gehen von einem von der Potentialdifferenz  $\Delta h$  zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser abhängigen Wasseraustausch  $Q_L$  aus, der durch einen „Übergangswiderstand“ (Leakagekoeffizient  $\lambda$ ) gesteuert wird. Allerdings beobachtet man häufig unterschiedliche Leakageflüsse  $Q_L$  bei Infiltration und Exfiltration trotz identischer Potentialdifferenz  $\Delta h$ . Ferner gibt es Hinweise auf einen hysteretischen Verlauf der funktionalen Beziehung zwischen Potentialdifferenz und Leakagefluss im Auf- und Ablauf eines Hochwasserereignisses, was auf eine zeitliche Variabilität des Leakagekoeffizienten hindeutet.

#### 1.2 Bedeutung für die WSV

Aufgrund gestiegener Anforderungen an die Belastbarkeit von Prognosen der Auswirkungen von wasserbaulichen Unterhalts- und Ausbaumaßnahmen auf den ökologischen Zustand von Flussauen, ist ein besseres Verständnis der Austauschprozesse zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser sowie der Rolle von Unterhalts- und Ausbaumaßnahmen unerlässlich. Hierfür sind Naturmessungen des Wasseraustauschs zwischen den Wasserkörpern entscheidend.

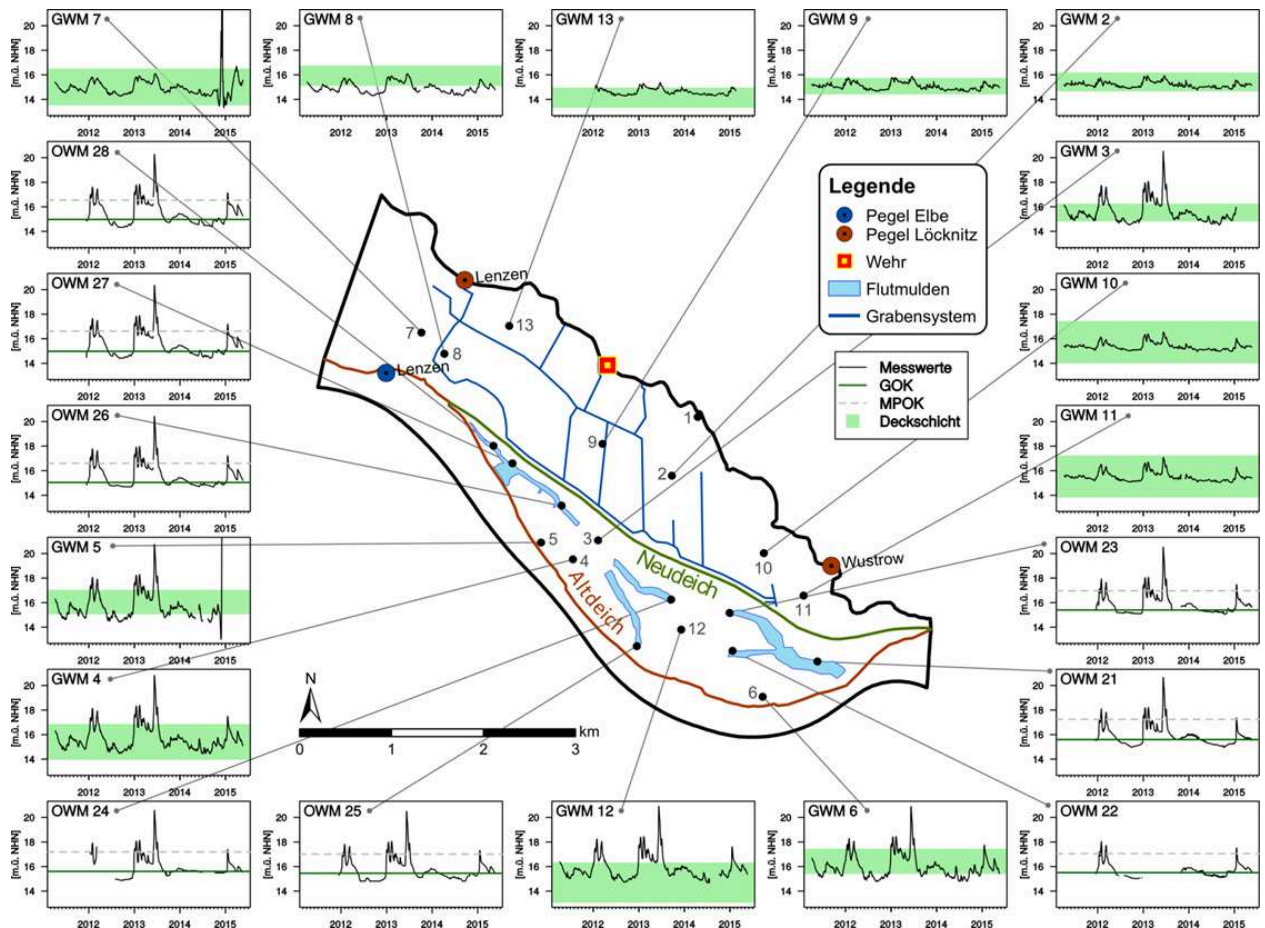
#### 1.3 Untersuchungsziel

Um das Prozessverständnis des Wasseraustauschs zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser zu vertiefen, wurden mit Unterstützung der Bundesanstalt für Gewässerkunde (KLIWAS Vorhaben 5.06 „Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der Flussauen“) und in Abstimmung mit dem BAW-Referat W2 Druckaufnehmer zur Erfassung räumlich und zeitlich hinreichend aufgelöster Wasserstände im Oberflächen- und Grundwasser installiert. Die Lage der Oberflächenwassermessstellen (OW) und der Grundwassermessstellen (GW) sowie das Relief im Untersuchungsgebiet (schwarze Berandung) sind in Bild 1 dargestellt. Das Erfassungssystem ist sehr robust. So werden im Überflutungsfall die gemessenen Wasserstände in einem Datenlogger zwischengespeichert und bei Auslaufen der Hochwasserwelle (Messstellenkopf ragt aus dem Wasser) per Funk an einen Datenserver übertragen.

### 2 Untersuchungsmethoden

Die Grundwasserströmung im Untersuchungsgebiet wurde auf Grundlage eines instationären 3D Finite-Elemente Modells für verschiedene Zeiträume untersucht. Bewusst wurden hierbei so wenig Modellparameter wie nur möglich angeordnet. So werden die geohydraulischen Eigenschaften des gesamten Modellgebiets lediglich durch einen Parametersatz bestehend aus hydraulischer Durchlässigkeit, effektiver Porosität sowie spezifischen Speicherkoeffizienten beschrieben. Entsprechend wurde zu Beschreibung des Wasseraustausches mit der Elbe, der Löcknitz, den Flutmulden, dem

alten Grabensystem sowie dem neu angelegten Entlastungsgraben hinter dem Neudeich jeweils ein einziger Leakageparameter angesetzt. Der Vergleich der mittleren Abweichungen zwischen Messung und Berechnung bietet die Möglichkeit, den Einfluss verschiedener Ansätze zur Beschreibung des Austausches zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser zu bewerten.



**Bild 1:** Ausdehnung des Grundwasserströmungsmodells im Deichrückverlegungsgebiet Lenz, gemessene Wasserstände [NN + m] und Lage der Oberflächenwassermessstellen (OWM) und Grundwassermessstellen (GWM) sowie der Flutrinnen (hellblau). Grüne Linien: Lage der GOK, grüne Balken: Mächtigkeit der Auelehmdecke.

### 3 Ergebnisse

Eine Auswertung der Messungen an den Flutmulden zeigte, dass eine Unterscheidung nach in- und exfiltrierenden Bedingungen kaum möglich war. Bereits geringste Wasserstandsänderungen ergaben aufgrund der großen Flutmuldenfläche erhebliche Austauschvolumina. Die schwierige Abschätzung von Grundwasserflüssen stellt nach wie vor ein zentrales Problem bei der Grundwassermodellierung dar. Bei der Modellierung der Grundwasserstände lagen die mittleren Differenzen (aus der Summe der quadratischen Abweichungen) gegenüber den Messungen im Bereich eines Dezimeters. Diese Abweichung verdoppelte sich in etwa bei einer Berechnung eines Zeitraumes mit ausgeprägter Abflussdynamik. Bei Überflutungszeiträumen ließen sich die Grundwasserstände mit einer Genauigkeit von etwa 4 Dezimeter (bei einzelnen Messstellen von bis zu 8 Dezimetern) modellieren. Die generelle Identifizierbarkeit der Austausch- und Aquiferparameter wurde anhand ihrer Korrelationen und der Sensitivitäten bewertet.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Die Ingenieurgesellschaft DHI-WASY wurde mit der Erstellung einer Schnittstelle zur Kopplung der Oberflächenwasserströmung mit dem Programmsystem MIKE11 (1D-HN-Modell) und der Grundwasserströmung mit dem Programmsystem FEFLOW (3D-Modell) beauftragt. Die Modellkopplung erfolgt hierbei bidirektional. Nach jedem Zeitschritt werden die Grundwasserzu- und -abflüsse, die mittels FEFLOW an den gekoppelten Randbedingungsknoten berechnet werden, an das Programm MIKE11, quasi als zeitlich veränderliche Randbedingung an den Berechnungsknoten (H-Punkte) weitergereicht. Mit diesen zusätzlichen Zu-/Abflussraten wird die Berechnung der Oberflächenwasserströmung mittels MIKE11 in internen Zwischenzeitschritten so lange fortgeführt, bis der nächste Berechnungszeitpunkt für die Grundwasserströmung mittels FEFLOW erreicht wird. Die am Ende dieses Zeitschritts berechneten Oberflächenwasserstände werden nun an das Grundwassermodell in Form von Leakage-Randbedingungen zurückgegeben, worauf mittels FEFLOW die Grundwasserpotentiale für den nächsten Zeitschritt berechnet werden und die gekoppelte Berechnungsschleife von neuem beginnt. Ferner wird ein weiterer Ansatz verfolgt, bei dem die Wasserstände eigener HN-Modelle (UnTrim) dem GW-Modell als Randbedingung übergeben werden. Bei diesem Ansatz wird jedoch die Rückwirkung des Grundwassers auf die Oberflächenwasserströmung nicht berücksichtigt.

Der für 2015 vorgesehene Abschlussbericht konnte nicht fertig gestellt werden, da die Ergebnisse der extern vergebene (DHI-WASY) Modellkopplung noch ausstehen. Der Abschlussbericht ist nun für Mitte 2016 nach Auswertung der der gekoppelten Oberflächenwasser- und Grundwasserströmungsberechnungen vorgesehen.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2016.

#### **5 Literatur**

BAW-Mitteilungsblatt Nr. 97, Dezember 2013, Die Deichrückverlegung bei Lenzen an der Elbe.

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Kolmation als Schlüsselgröße der Wechselwirkung Oberflächenwasser – Grundwasser**

**Netzplan-Nr.:** A39520370003

**Projektleiter:** Dipl.-Geol. D. Straßer, Dr.-Ing. H.J. Lensing, Abteilung Geotechnik,  
Referat Grundwasser (G3)

**E-Mail:** daniel.strasser@baw.de, hoerby.lensing@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Interaktion zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser wird neben den hydrogeologischen Randbedingungen maßgeblich durch die Gewässerstruktur, Substratzusammensetzung der Gewässersohle und der Ausbildung des Grundwasserleiters gesteuert. Hierbei ist die Kolmation einer Gewässersohle, d. h. alle Vorgänge die zu einer Reduktion des Porenvolumens, einer Verfestigung des Filtermediums und zu einer Durchlässigkeitsabnahme der Gewässersohle führen, als Schlüsselgröße zu sehen. Prinzipiell wird zwischen einer äußeren Kolmation, d. h. einer Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen auf der Gewässersohle, einer inneren Kolmation, d. h. einem Eintrag und einer anschließenden Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen in der Gewässersohle, sowie einer biologischen und physiko-chemischen Kolmation, d. h. einer Förderung der Kolmationsbildung durch biologische sowie physiko-chemische Prozesse, unterschieden. Dabei wird die Kolmation von Gewässersohlen von zahlreichen zeitlich und räumlichen variablen Einflussfaktoren beeinflusst.

Die komplexen Wirkungszusammengänge der verschiedenen Einflussfaktoren sind durch zahlreiche Forschungsaktivitäten bereits identifiziert und untersucht sowie in der Fachliteratur beschrieben worden. Jedoch sind bisher kaum Untersuchungen durchgeführt worden, die die besonderen Randbedingungen, die an Bundeswasserstraßen anzutreffen sind, entsprechend berücksichtigen. Dadurch ist eine belastbare Prognose von Auswirkungen, die durch wasserbauliche Maßnahmen bedingt sind, auf die Wechselwirkung zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser im Bereich der Bundeswasserstraßen nur unzureichend möglich.

Für die im Rahmen des FuE-Vorhabens relevanten Einflussfaktoren wurden Laborversuchen durchgeführt (SCHÄCHLI, 1993). Wie bereits BLASCHKE et al. (2003) feststellt, erfolgte jedoch bisher noch keine Verifizierung der Ergebnisse dieser Laborversuche anhand von Feldversuchen. Zudem gibt es auch kaum Untersuchungen die die für Bundeswasserstraßen charakteristischen Randbedingungen berücksichtigen (z. B. Geschiebemanagement, Einwirkungen durch schiffsinduzierte Strömungen, Einfluss wasserbaulicher Bauwerke, Einfluss von Hochwasserereignisse, Stauhaltung, etc.).

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Durch Unterhalts-, Ausbau und Renaturierungsmaßnahmen an Bundeswasserstraßen können die Wechselwirkungen zwischen Fließgewässer und dem angrenzenden Grundwasserkörper maßgeblich verändert werden. In Flussabschnitten mit einer naturnahen Wasserstandsdynamik lassen sich baubedingte Auswirkungen auf die quantitativen und qualitativen Grundwasserverhältnisse derzeit nicht mit der erforderlichen Genauigkeit prognostizieren. Diese Wissensdefizite führen bei verkehrswasserbaulichen Maßnahmen im Einflussbereich von aquatischen Ökosystemen, deren Schutz und deren Zustandsverbesserung als Ziel der EU-WRRL explizit formuliert sind, sowie im Einflussbereich konkurrierender Wassernutzungen (z. B. Uferfiltrat-fördernder Trinkwasserfassungen) zu einem erhöhten wasserwirtschaftlichen Konfliktpotenzial. Die fachlichen und juristischen Auseinandersetzungen bei der Bearbeitung aktueller Ausbauprojekte der WSV zeigen auf, dass insbesondere im Bereich grundwasserabhängiger Ökosysteme neben den naturschutzfachlichen Aspekten vor allem konkurrierende wasserwirtschaftliche Anforderungen für die Bewertung der Vorhaben maßgeblich sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel dieses FuE-Vorhabens ist es, die einzelnen – für die Bundeswasserstraßen relevanten – Wirkungsfaktoren dieser komplexen Wechselwirkungen zu identifizieren und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Kolmationsprozesse näher zu bewerten. Ein weiteres Ziel des FuE-Vorhabens ist die Bewer-

tung verschiedener hydrogeologischer Methoden hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit und ihren Anwendungsgrenzen in Bezug auf die Kolmationsfragestellung. Dadurch soll zukünftig eine bessere Prognose und Bewertung der geohydraulischen Auswirkungen von wasserbaulichen Unterhalts- und Ausbaumaßnahmen mit der erforderlichen zeitlichen und räumlichen Auflösung ermöglicht werden, um wirtschaftlich und naturschutzfachlich optimierte Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen umsetzen zu können. Die Forschungsergebnisse bilden eine wichtige Grundlage um Flüsse, Seen und Kanäle als umweltverträgliche Verkehrswege zu erhalten und gleichzeitig eine Optimierung des ökologischen Zustands gemäß EU-WRRL (und damit assoziierte Umweltziele wie z. B. Erhaltung der Biodiversität usw.) zu erreichen und somit einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung der Bundeswasserstraßen leisten zu können.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Am Versuchsstandort Potsdam wurden im Zeitraum zwischen September 2012 und März 2013 zwei Transekte zur kontinuierlichen tiefenorientierten Untergrundtemperaturmessung installiert. Durch Verwendung der Temperatur als natürlichen Tracer können bevorzugte Infiltrationszonen in den Untergrund identifiziert und Infiltrationsgeschwindigkeiten sowie Verweilzeiten bestimmt werden. Der Sacrow-Paretzer-Kanal wurde hierfür gezielt als Versuchsstandort gewählt, da ab Mai 2013 bei Ausbauarbeiten die Sohle des Kanals vertieft wurde. Hierbei wurde die vorhandene Kolmationsschicht stark gestört und teilweise entfernt. Begleitet wird die Messung der tiefenorientierten Untergrundtemperatur durch Monitoring der Grundwasserstände und –temperaturen in 13 Grundwassermessstellen des WNA Berlin sowie der Stadtwerke Potsdam.

Ergänzend zu den Bodentemperaturmessungen wurden in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Untersuchungen des Sauerstoffisotopenverhältnisses in Niederschlag, Grundwasser und Oberflächenwasser durchgeführt. Die hierfür erforderliche wöchentliche Grundwasserbeprobung wurde an 12 Grundwasser- und 2 Oberflächenwassermessstellen durchgeführt.

Bereits im Vorfeld der Ausbauarbeiten wurde der „Ist-Zustand“ der Gewässersohle durch eine flächendeckende Beprobung (Freeze-Core, Infiltrationsversuche) dokumentiert. Weitere Probenahmeaktionen werden begleitend zum Ausbau des Sacrow-Paretzer-Kanals durchgeführt um die Veränderung der Gewässersohle fortlaufend zu dokumentieren.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden darüber hinaus Grund- und Oberflächenwasser-Markierungsversuche durchgeführt. Die Ausführung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Geowissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

## **3 Ergebnisse**

Die Ergebnisse der Bodentemperaturmessungen im Bereich des Nedlitzer Durchstichs zeigen eine Infiltration von Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter an (Bild 1). Die gemessenen Werte weichen deutlich von denen eines idealisierten Tiefenprofils der Bodentemperatur ohne Oberflächenwassereinfluss ab. Der hohe zeitliche Versatz des Durchschlags der Oberflächenwassertemperatur zum Messpunkt zeigt eine Kolmation des untersuchten Bereichs an. Nach Beginn der Baumaßnahmen im Mai 2013 hat dieser zeitliche Versatz deutlich abgenommen. Warmes Oberflächenwasser konnte im Sommer 2013 schneller in den Untergrund infiltrieren. Außerdem war ein signifikanter Anstieg des Grundwasserstands im kanalnahen Untergrund zu beobachten. Die Wiedereinstellung des Ausgangszustands nach Beendigung der Baumaßnahme ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig erfolgt.

Die Ergebnisse der Gefrierkernprobenahmen wurden im Jahr 2013 in zwei Masterarbeiten und im Jahr 2015 durch eine internationale Fachpublikation (Straßer et al, 2015) dokumentiert. Durch ein auf die Gefrierkernprobenahme abgestimmtes Laborprogramm konnte die Anisotropie von Gewässersohlsedimenten räumlich hochaufgelöst und tiefenorientiert bestimmt werden.

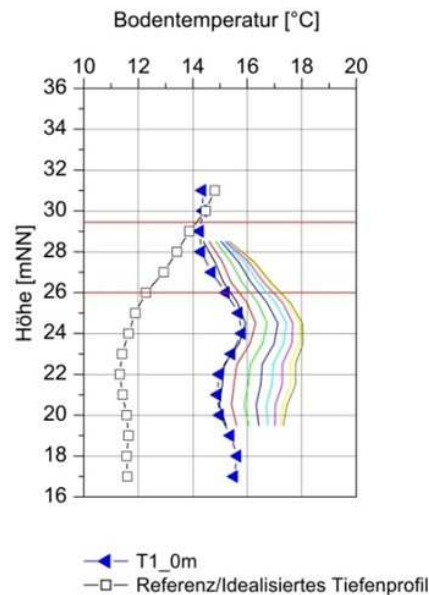


Bild 1: Ergebnisse der Bodentemperaturmessungen im Bereich Nedlitzer Durchstich

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016: Weiterführung der Feldarbeiten durch den Forschungspartner Universität Potsdam am Standort Brandenburg an der Havel  
Weiterführung der Aus- und Bewertung der Ergebnisse inklusive der Erstellung detaillierter Grundwasserströmungs- bzw. Transportmodelle in Zusammenarbeit mit dem Institut für Erd- und Umweltwissenschaften der Universität Potsdam für den Standort Brandenburg an der Havel  
Erstellung mehrerer wissenschaftlicher Veröffentlichungen zu den Ergebnissen der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden

2017: Erstellung eines Abschlussberichts.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2018 (beantragt).

#### 5 Literatur

- Blaschke, A. P., Steiner, K.-H., Schmalfluss, R., Gutknecht, D., Sengschmitt, D. (2003): Clogging Processes in Hyporheic Interstices of an Impounded River, the Danube at Vienna, Austria, Internat. Rev. Hydrobiol. 88, 397 – 413
- Brunke, M., Gonser, T. (1997): The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, Freshwater Biology, 37, 1-33
- Mitchell-Bruker, S., Haitjema, H. M. (1996): Modeling steady state conjunctive groundwater and surface water flow with analytical elements – Water Resources Research, 32 2735 - 2732
- Schälchli, U. (1993): Die Kolmation von Fließgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen – Technische Hochschule Zürich (VAW) Nr. 124

#### 6 Veröffentlichungen

- Straßer, D., Lensing, H.-J., Richter, D., Frank, S., Goldscheider, N. (2014): Die Gefrierkernmethode - Weiterentwicklung des Erkundungsverfahrens zur geohydraulischen Charakterisierung von Sohlsedimenten, Ohde-Kolloquium, Vortrag, Dresden.
- Straßer, D. (2014): Gefrierkernprobenahme – Ein Erkundungsverfahren zur hydraulischen Charakterisierung von Sohlsedimenten, Tagung der FHDGG, Poster, Bayreuth.

- Straßer, D.; Lensing, H.-J.; Nuber, T.; Richter, D.; Frank, S.; Göppert, N.; Goldscheider, N. (2015): Improved geohydraulic characterization of river bed sediments based on freeze core sampling – Development and evaluation of a new measurement approach. Veröffentlichung: Journal of Hydrology, No. 8, 2015.
- Straßer, D.; Montenegro, H.; Liesch, T. (2015): Markierungsversuche zur Bestimmung der Grundwasserströmungsverhältnisse im lösungsempfindlichen Baugrund. Vortrag: BAW-Kolloquium „Projekte der Geotechnik an Bundeswasserstraßen“, Karlsruhe, 10./11. Februar 2015 Veröffentlichung: Tagungsband.



## **Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke**

**Netzplan-Nr.:** A39520410006

**Projektleiter/in:** Dipl.-Ing. P. Fleischer, Dr.-Ing. J. Kayser, Abteilung Geotechnik,  
Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** petra.fleischer@baw.de, jan.kayser@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die derzeitige Bemessung von Deckwerken aus losen oder teil- bzw. vollvergossenen Wasserbausteinen im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) erfolgt für Standardfälle nach dem „Merkblattes zur Anwendung der Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen“ (MAR), ansonsten nach den „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen“ (GBB), die die theoretischen Bemessungsgrundlagen nach dem derzeitigen Stand der Technik beinhalten. Zur Erleichterung der Anwendbarkeit des GBB wurden die Berechnungsalgorithmen zusätzlich in einer Software „GBBSoft“ umgesetzt. Die überwiegend auf Erfahrungen beruhenden, parameterbehafteten Bemessungsansätze müssen jedoch weiter präzisiert werden. Dazu ist es erforderlich, verstärkt praktische Erfahrungen mit bestehenden Deckwerken zu sammeln, zu dokumentieren und systematisch auszuwerten, um auf dieser Grundlage die Bemessungsansätze zu validieren und kontinuierlich bedarfsgerecht weiterzuentwickeln. Aus diesem Grund wurde vor einigen Jahren mit einer umfassenden, langfristig angelegten Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerken der WSV begonnen. Dabei werden möglichst viele unterschiedliche Wasserstraßenabschnitte hinsichtlich des Erhaltungszustandes der Deckwerke und des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Randbedingungen und der hydraulischen Belastung im Vergleich zu den theoretisch erforderlichen Deckwerksabmessungen begutachtet. Das Ziel besteht letztendlich darin, die Deckwerkbauweisen an Binnenwasserstraßen durch Präzisierung der theoretischen Grundlagen auf der Basis der Ergebnisse der Bestandsaufnahme sukzessiv weiter zu optimieren.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Einer hinsichtlich Standsicherheit und Kosten optimalen Bemessung der Deckwerke hinsichtlich der hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt kommt aufgrund des großen Investitionsvolumens bei Ufersicherungen in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes ein hoher Stellenwert zu.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Auf der Grundlage der Bestandsaufnahme von Deckwerken erfolgt für jeden Untersuchungsabschnitt eine vergleichende Dokumentation des ermittelten Soll- und Istzustandes der Deckwerke. Es werden Zustandsanalysen unter Berücksichtigung der konkreten geometrischen, geotechnischen und hydraulischen Randbedingungen sowie umfassende Schadensanalysen durchgeführt. Auf der Grundlage der Ergebnisse werden die bestehenden Berechnungsgrundlagen validiert. Das Vorschriftenwerk der WSV wird dementsprechend immer wieder angepasst, so dass die Deckwerke hinsichtlich Standsicherheit und Kosten laufend weiter optimiert werden können.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Folgende Untersuchungsmethoden kommen zur Anwendung:

- Erfassung des Aufbaus und Erhaltungszustandes der Deckwerke und der technischen Randbedingungen (z. B. Geometrie, Baugrund) in situ sowie des Unterhaltungsaufwandes in ausgewählten Wasserstraßenabschnitten,
- Durchführung von Naturmessungen in ausgewählten Wasserstraßenabschnitten zur Ermittlung der hydraulischen Uferbelastungen infolge Schifffahrt,

- Theoretische Berechnungen zur Ermittlung der erforderlichen Deckwerksabmessungen unter den ermittelten Randbedingungen unter Verwendung der Software GBBSoft, Vergleich mit den jeweils ermittelten Istzuständen,
- Auswertung der Ergebnisse, Validierung der Bemessungsansätze (GBB),
- Untersuchungen zu neuen Möglichkeiten der Erfassung des Zustandes des Deckwerks über und unter Wasser,
- Formulierung von Empfehlungen für eine optimale Bemessung und Ausführung von Deckwerken.

### 3 Ergebnisse

Bisher wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Deckwerke in 8 unterschiedlichen Abschnitten folgender Wasserstraßen begutachtet:

- Süd- und Nordstrecke des Dortmund-Ems-Kanals,
- Wesel-Datteln-Kanal,
- Main-Donau-Kanal,
- Mittellandkanal,
- Untere Havel-Wasserstraße.

Dabei handelte es sich um durchlässige Deckwerke überwiegend aus losen Wasserbausteinen, nur am Mittellandkanal wurden auch Deckwerke aus teil- und vollvergossenen Wasserbausteinen untersucht. Die Ergebnisse wurden ausgewertet und in Teilberichten dargestellt und bildeten u. a. die Grundlage für eine Optimierung der Bemessungsansätze des GBB. 2011 konnte eine überarbeitete Fassung des GBB veröffentlicht werden.

Die bisherigen Untersuchungen haben auch gezeigt, dass Echolot-Verkehrssicherungspeilungen, die bisher schwerpunktmäßig hinsichtlich Untiefen als Gefahr für die Schifffahrt ausgewertet werden, auch sehr gut zur Beurteilung der Deckwerksoberfläche hinsichtlich eines qualitätsgerechten Einbaus, aber auch langfristig hinsichtlich Deckwerksschäden herangezogen werden können. Das Merkblatt zur Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen MAR (2008) empfiehlt deshalb zum Nachweis einer qualitätsgerechten Deckwerksherstellung zusätzlich die Durchführung von Flächenpeilungen. Außerdem sollten die Verkehrssicherungspeilungen zukünftig insbesondere in Dichtungsstrecken regelmäßig auch hinsichtlich des Zustandes der Deckschichten ausgewertet werden, um Fehlstellen und eine mögliche Gefährdung der Dichtung rechtzeitig zu erkennen.

Aus Zeitgründen und aufgrund anderer Prioritäten mussten die Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes von 2012 bis 2015 unterbrochen werden.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Folgende Arbeiten sind im nächsten Jahr vorgesehen:

- Durchführung weiterer Untersuchungen zur Zustandserfassung von Deckwerken unter Wasser,
- Auswertung der Messungen an der UHW,
- Bilanz der bis jetzt untersuchten Strecken mit einem Zwischenfazit, danach Entscheidung über die Untersuchungen an weiteren Strecken.

Auf dieser Grundlage werden die Ergebnisse aus dem FuE-Projekt schwerpunktmäßig hinsichtlich der Beurteilung der Notwendigkeit und der Bemessung von Ufersicherungen an Wasserstraßen mit geringem Verkehrsaufkommen ausgewertet. Das weitere Untersuchungskonzept soll dahingehend angepasst werden. Dabei sind verstärkt auch die Ergebnisse des Projektes „Entwicklung des Zustandes von Deckwerken bei Absenkung des technischen Standards“ (A39520470004) zu berücksichtigen. Aufgrund der z. T. langjährigen Beobachtung von Teilstrecken und zur Umsetzung des Untersuchungsprogramms unter den neuen Fragestellungen wird das Forschungsvorhaben noch ca. 1 Jahr in Anspruch nehmen.

Laufzeit des Vorhabens: 1999 bis 2016.

## **5 Literatur**

-/-

## **6 Veröffentlichungen**

Fleischer, P., Kayser, J. (2010) : Experience with revetments for inland waterways in Germany, 32. PIANC Congress, Liverpool, Großbritannien, 12. bis 14. Mai 2010.

## **Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung**

**Netzplan-Nr.:** A39520410076

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Kayser, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** jan.kayser@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In der Geotechnik werden Filter noch überwiegend nach geometrischen Kriterien bemessen, die an körnigen Materialien unter stationärer, einseitiger Durchströmung mit begrenzten hydraulischen Gradienten untersucht wurden. Unter dem Einfluss von Druckwechselbelastungen können hohe hydraulische Gradienten auftreten, welche insbesondere bei feinkörnigen Böden ohne Kohäsion zu Bodenverlagerungen führen können. Diese werden durch die gasförmigen Einschlüsse in den Poren und dem Porenwasser hervorgerufen, welche die Kompressibilität des Porenwassers signifikant verändern. Zur Beurteilung dieses Einflusses auf die Stabilität und Bemessung sowohl der geotextilen Filter als auch der Kornfilter fehlen derzeit noch eindeutige Kriterien.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Interaktion zwischen Filter und Boden wird an den Böschungs- und Sohlsicherungen der Bundeswasserstraßen im Unterwasserbereich maßgeblich von Wechselbelastungen bestimmt. Diese werden i. d. R. durch von der Schifffahrt induzierte Wellen hervorgerufen. Derzeit erfolgt die Filterbemessung für Kornfilter nach den Angaben des Merkblattes der BAW „Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen“ (MAK) und dem darin verwendeten Ansatz nach Cistin/Ziems. Hierbei ist jedoch noch weitgehend offen, inwieweit der Einfluss aus dynamischen Belastungen in den bestehenden Kriterien berücksichtigt werden muss oder ob vollkommen neu zu definierende Bemessungskonzepte für die geschilderte Fragestellung erforderlich sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, eindeutige Kriterien zur Beurteilung des Einflusses von Wechselbelastungen auf die Stabilität und Bemessung sowohl von geotextilen Filtern als auch von Kornfiltern zu erhalten.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die Abteilung Erddamm- und Deponiebau des Instituts für Boden- und Felsmechanik (IBF) der Universität Karlsruhe (TH) hat von November 2003 bis zum Juni 2006 im Rahmen des FuE Vorhabens Versuche durchgeführt und die Versuchsergebnisse in einem Endbericht dokumentiert. Die hierbei angewendeten Untersuchungsmethoden wurden bereits erläutert.

Zur Untersuchung der hieraus abgeleiteten weiteren Fragestellungen wurde eine vollständige Überarbeitung der Wechseldurchströmungsanlage (WDA) erforderlich. Mit Hilfe der neuen Anlage können die üblicherweise an Wasserstraßen auftretenden hydraulischen Druckwechselbelastungen bei gleichzeitiger Durchströmung der Probe aufgebracht werden. Bei den in der Wasserstraße üblichen Drücken bis 4 m Wassertiefe entstehen hierbei Porenwasserüberdrücke. Wird hingegen dieselbe Druckwechselbelastung bei einem Druck von 50 m Wassertiefe aufgebracht, so wird die Bodenluft soweit komprimiert, dass nahezu keine Druckdämpfung mehr stattfindet und dementsprechend auch keine Porenwasserüberdrücke mehr entstehen. Zur Beurteilung dieses Effektes auf die Filterstabilität sollen Versuche auf unterschiedlichen Druckniveaus durchgeführt werden. Bild 1 zeigt die fertig aufgebaute WDA zusammen mit der Versuchszelle, die im Rahmen der Forschungsarbeiten „KOFIMARS - Grundlagen für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern mariner Strukturen“ erstellt wurde.

### 3 Ergebnisse

Derzeit läuft eine Kooperation mit dem Leichtweißinstitut (LWI) der TU Braunschweig, in deren Rahmen das LWI die WDA mit Beteiligung der BAW für das Forschungsprojekte KOFIMARS zur Untersuchung von Filtern unter großer hydraulischer Belastung einsetzt. Hierfür wurden in 2014 umfangreiche Untersuchungen an der WDA durchgeführt. Die Untersuchungen werden derzeit vom LWI ausgewertet. Bild 1 zeigt den Versuchsaufbau mit einer Basis aus Mittelsand und einem aufliegende mineralischen Filter. Durch Variation der Filterkörnung wurden unterschiedliche Basis-Filter-Kombinationen untersucht.

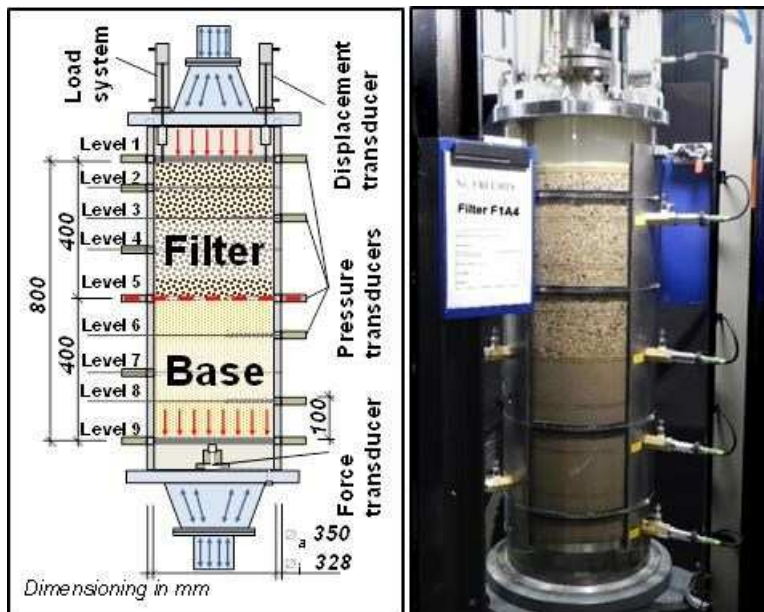


Bild 1: Versuchsaufbau für Filterversuche im Permeameter an der WDA

Durch Druckänderungen an der Oberseite des Permeameters wurde der Probekörper in wechselnder Richtung durchströmt. Die Gradienten, die sich dabei im Bereich der Schichtgrenze zwischen Filter und Basis einstellen, sind in Bild 2 dargestellt.

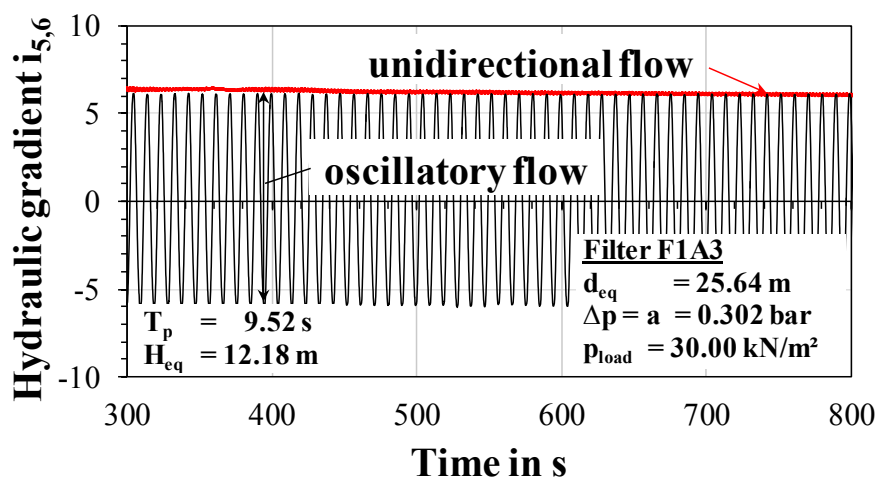


Bild 2: Hydraulische Gradienten in der Grenzschicht Basis-Filter im Versuchsverlauf

Ein Kriterium zur Bewertung der Stabilität der untersuchten Basis-Filter-Kombinationen ist die an der Oberkante des Versuchskörpers gemessene Verformung. Instabile Verhältnisse machen sich durch

anhaltende Vertikalverformungen bemerkbar, die durch Vermischen von Basis- und Filtermaterial und der dadurch bewirkten Porenraumverringering entstehen. Die Vertikalverformungen für einen Versuch sind in Bild 3 sowohl für unidirektionale als auch für wechselnde (oscillatory flow) Durchströmung dargestellt.

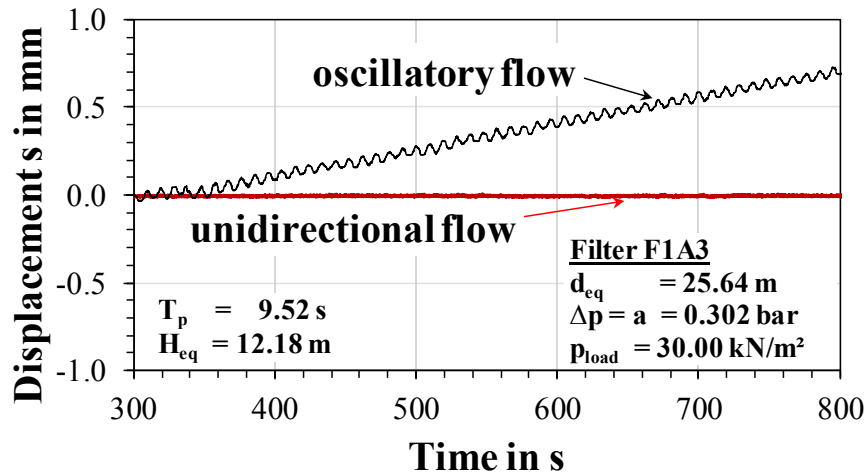


Bild 3: Verformungen an der Oberseite der Probe unter der hydraulischen Wechselbelastung entsprechend Bild 2

Die Verformungen zeigen, dass die Basis-Filter-Kombination unter unidirektionaler Durchströmung stabil ist, allerdings unter wechselnder Durchströmung instabil wird. Dieser Befund ist noch weiter zu präzisieren, da er erhebliche Auswirkungen auf die Dimensionierung von Kornfiltern unter oszillierender Durchströmung hat.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die weitere Auswertung der Versuche erfolgt durch das LWI, ggf. sind noch ergänzende Untersuchungen erforderlich.

In 2016 wird an der WDA eine Masterarbeit zusammen mit dem KIT durchgeführt. Es werden Modellversuche durchgeführt, mit dem Ziel ein gutes Verständnis der auftretenden Prozesse im Boden in Abhängigkeit der maßgebenden Bodenparameter (Durchlässigkeit, Steifigkeit, Luftgehalt, etc.) und der hydrodynamischen Randbedingungen zu erlangen. Diese Prozesse haben Auswirkungen auf das Filterverhalten, da sie unter instationären hydraulischen Beanspruchungen den hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze beeinflussen. Neben den Modellversuchen an unterschiedlichen Bodenmaterialien sind auch Simulationsberechnungen zur Prognose der welleninduzierten Prozesse vorgesehen.

Des Weiteren sind eine Veröffentlichung und ein Konferenzbeitrag zu dem Themenkomplex der oszillierenden Durchströmungen in Vorbereitung.

Laufzeit des Vorhabens: 2002 bis 2016.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

Schürenkamp, D.; Oumeraci H.; Kayser, J., Karl, F. (2014): Numerical and laboratory experiments on stability of granular filters in marine environment, Proceedings of 34th Conference on Coastal Engineering, Seoul, Korea

## **Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen – Quantifizierung ihrer Belastbarkeit und Möglichkeiten ihrer Anwendung an Binnenwasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39520410151

**Projektleiter/in:** Dipl.-Ing. P. Fleischer, Dr.-Ing. R. Soyeaux, Abteilung Geotechnik,  
Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** petra.fleischer@baw.de, renald.soyeaux@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Um die Ufer von Binnenwasserstraßen dauerhaft vor Erosionen und anderen negativen Auswirkungen der hydraulischen Belastung aus Schifffahrt zu schützen, werden diese in der Regel mit technischen Deckwerken aus Steinschüttungen oder Spundwänden gesichert. Anwendungsgrundlage ist ein breites Regelwerk der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Seit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) im Jahr 2000 sind bei allen Aus- und Neubaumaßnahmen sowie Unterhaltungsarbeiten an Wasserstraßen neben den technischen Anforderungen verstärkt ökologische Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Als Uferschutz sollen zukünftig naturnähere Bauweisen unter Einbeziehung von Pflanzen als Alternative zur klassischen Steinschüttung angewendet werden. Für deren Einsatz an Wasserstraßen gibt es allerdings immer noch zu wenige Erfahrungen. Deshalb werden in einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Untersuchungen zur hydraulischen Belastbarkeit und ökologischen Wirksamkeit technisch-biologischer Ufersicherungen mit dem Ziel durchgeführt, Anwendungsempfehlungen und Bemessungsgrundlagen für deren Einsatz an Binnenwasserstraßen zu erarbeiten.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Mit den Untersuchungsergebnissen werden dem planenden Ingenieur der WSV sukzessiv fundierte Grundlagen zur Anwendung von technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen und damit wichtige Entscheidungshilfen für zukünftige Uferumgestaltungen zur Verfügung gestellt, wie sie z. B. in den nächsten Jahren im Rahmen des Bundesprogramms „Blaues Band“ zur Renaturierung von Bundeswasserstraßen vorgesehen sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Technisch-biologische Ufersicherungsarten, die sich aufgrund der Untersuchungen als geeignet für die Anwendung an Wasserstraßen erweisen, werden in einem Regelwerk zusammengestellt. Deren Belastbarkeit wird speziell hinsichtlich der Uferbelastungen infolge Schifffahrt quantifiziert und es werden Bemessungsgrundlagen erarbeitet. Dabei fließen auch die Ergebnisse des parallel laufenden Forschungsprojektes „Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit“ (A39520470002) zur gleichen Thematik mit ein.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Da das Projekt eine Gemeinschaftsarbeit der Referate Erdbau und Uferschutz (G4, federführend) und Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4) der BAW sowie der Referate Landschaftspflege/Vegetationskunde (U3) und Tierökologie (U4) der BfG ist, können sowohl technische als auch biologische Aspekte berücksichtigt werden. Folgende Untersuchungsmethoden kommen zur Anwendung:

- Sichten und Bewerten vorhandener Literatur und praktischer Erfahrungen erster lokaler Anwendungen in der WSV,
- Durchführung von Naturmessungen und Untersuchungen in bestehenden und neu anzulegenden Versuchsstrecken, Erfassung aller technischen und biologischen Randbedingungen einschließlich der hydraulischen Belastungen, Durchführung von Labor-, Modell- und Naturversuchen,
- Begutachtung und Bewertung des Zustandes und der Entwicklung von Ufersicherungen mit Pflanzen hinsichtlich Uferschutz sowie ökologische Bewertung der Vegetation und Fauna,

- Ermittlung der Belastbarkeit der in den Versuchsstrecken und Naturversuchen getesteten unterschiedlichen Ufersicherungsarten,
- Auswertung der Gesamtergebnisse, Formulierung von Empfehlungen und Bemessungsansätzen.

### 3 Ergebnisse

Alle bisher vorliegenden Ergebnisse sind auf dem speziell zu dieser Thematik eingerichteten Internet-Fachportal der BAW und BfG veröffentlicht (<http://ufersicherung.baw.de/de/index.html>). Der erste Bericht (BAW, BfG 2008) beinhaltet die Ergebnisse einer internationalen Literaturrecherche und einer Umfrage in der WSV zu bereits bestehenden ersten Erfahrungen mit alternativen Ufersicherungen. Im zweiten Bericht (BAW, BfG 2010) sind die Ergebnisse einer umfangreichen Detailuntersuchung in einer bereits vor etwa 20 Jahren angelegten Versuchsstrecke an der Mittelweser dargestellt. Die wichtigsten Ergebnisse aus beiden Berichten wurden außerdem in den BAW-Briefen 2/2006 bzw. 1/2011 veröffentlicht.

Einen Schwerpunkt der Arbeiten bildete auch 2015 der Naturversuch am Rhein (km 440,6 bis km 441,6), bei dem seit 2011 am rechten Ufer 9 verschiedene technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen unter Wasserstraßenbedingungen getestet werden. Träger der Maßnahme ist das WSA Mannheim. In 5 Abschnitten wurde die vorhandene Steinschüttung oberhalb Mittelwasser entfernt und durch neue überwiegend pflanzliche Maßnahmen (Weidenspreitlagen, Röhrichtgabionen, Steinmatratzen, Pflanzmatten) ersetzt. In einem Abschnitt blieb das Ufer weitestgehend ungesichert. In 4 Abschnitten erfolgten ökologische Aufwertungen der weiterhin mit Wasserbausteinen gesicherten Böschung (Setzstangen, Faschinen, Busch- und Heckenlagen). In einem Bericht wurden 2012 die einzelnen Bauweisen dokumentiert und das Monitoringprogramm erläutert (Kurzfassung im BAW-Brief 5/2012). Die Monitoringergebnisse aus der kritischen Anfangszeit nach Bauabschluss wurden in einem umfangreichen Bericht 2013 veröffentlicht.

Seitdem werden die Monitoringaktivitäten in der Versuchsstrecke fortgesetzt und die Ergebnisse in jährlichen Berichten dokumentiert. 2013 trat das seit Einrichtung der Versuchsstrecke höchste Hochwasser auf, das die Uferböschung und das angrenzende Gelände mehrere Tage vollständig überflutete. Ein 10-wöchiger ununterbrochener Einstau des unteren Böschungsbereiches (bis etwa AZW + 1,50 m) im Frühjahr 2013 mit anschließender 8-wöchiger Trockenperiode wirkte sich sehr stark auf die Vitalität der Pflanzen aus. Nachdem es 2014 nur zwei kleinere Hochwasserereignisse bis etwa zur Marke I (AZW + 2,40 m) gab, war das Jahr 2015 wieder sehr durch lange Hochwasserereignisse mit hohen Wasserständen geprägt. Die hydraulischen Uferbelastungen (Wellen, Absunk, Strömungen) und Porenwasserdrücke als Reaktion im Boden wurden in einem Messeinsatz Anfang Mai 2015 bei Wasserständen von ca. 3 m über AZW gemessen.

Es zeigt sich, dass lange Überstauzeiten mit wirkendem Auftrieb und Strömungen sowie gleichzeitigen schiffsinduzierten Einwirkungen die Pflanzen sehr stark belasteten. Ein Ausfall von Pflanzen ist besonders in den Versuchsfeldern von hoher Relevanz, in denen die neuen pflanzlichen Sicherungen den Uferschutz gewährleisten müssen. Die bereits gut entwickelten Weidenspreitlagen (VF 2 und 3) konnten die bisherigen Belastungen gut verkraften. Wie auch die Steinmatratzen (VF 5) erwiesen sie sich weiterhin als stabil und als guter Uferschutz. Das gilt auch für die Pflanzmatten im oberen Böschungsbereich (VF 7). Der Zustand der Röhrichtgabionen (VF 5) hat sich dagegen nach großflächigem Ausfall einzelner Pflanzenarten durch Überstau 2015 weiter verschlechtert. Als überstauungstolerant haben sich insbesondere die Großseggen erwiesen, Rohr-Glanzgras und Weißes Straußengras sind dagegen im Bereich der langen Einstauphasen vollständig ausgefallen (BAW, BfG, WSA 2015). Der Uferschutz ist durch die Gabionen selbst noch gewährleistet, es erfolgt eine intensive Beobachtung. Größere Schäden im häufig eingestauten Bereich der Pflanzmatten führten bereits 2013 zu einer Sicherung des unteren Böschungsbereiches mit einer Steinschüttung.

In den Versuchsfeldern, in denen die alte Steinschüttung erhalten blieb, entwickelten sich die zur ökologischen Aufwertung eingebrachten Pflanzen auch 2015 weiter positiv. Insbesondere die Gehölze bilden bereits dichte und im Wechsel mit standorttypischer, krautiger Ufervegetation strukturell aufgewertete Habitatkomplexe. 2015 erfolgte eine weitere Wurzelgrabung in Zusammenarbeit mit der FH Erfurt, um mehr Erkenntnisse zum Wachstum der Wurzeln der eingebauten Weiden und deren Wirksamkeit hinsichtlich Uferschutz zu gewinnen. Insgesamt konnten bereits erste konkrete Erkennt-



nisse hinsichtlich der Anwendungsgrenzen verschiedener Ufersicherungen an Wasserstraßen gewonnen werden (Behrendt et al., 2015). Eine endgültige Beurteilung der eingebauten technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich Gewährleistung des Uferschutzes, Unterhaltungskosten und ökologischer Wirksamkeit ist erst nach mehreren Vegetationsperioden möglich und für 2017 vorgesehen.

2015 wurden die Ergebnisse der Labor- und Modellversuche, die von 2009 bis 2014 an Weiden zur Beurteilung der Wurzelbildung, der damit einhergehenden Scherfestigkeitserhöhung des Bodens und der Belastbarkeit von Weidenspreitlagen durchgeführt wurden, in einer Dissertation dokumentiert (Eisenmann, 2015). Seit 2014 werden diese Untersuchungen fortgesetzt. Im Rahmen eines weiteren Promotionsvorhabens wurden 2015 Modellversuche im Wellenbecken zum Einfluss der oberirdischen Weidensprosse einer Spreitlage auf die Strömungsgeschwindigkeiten hinsichtlich Erosion, aber auch hinsichtlich einer möglichen Behinderung des Hochwasserabflusses in der Natur durchgeführt. Gleichzeitig wurden weitere Scherversuche durchgeführt und Versuche zur Ermittlung der Filterstabilität von Weidenspreitlagen in verschiedenen Entwicklungszuständen vorbereitet. Dazu wurden Versuchskästen zum Vorziehen von Weiden gebaut und eine Versuchseinrichtung konzipiert und angefertigt. 2016 werden die Filterversuche durchgeführt. Hier geht es u.a. um die Frage, ob bei der Anwendung von Weidenspreitlagen zusätzliche temporäre Filterschichten für den Anfangszustand erforderlich sind.

Auf der Grundlage der bisherigen Erkenntnisse insbesondere aus der Versuchsstrecke am Rhein wurden Kennblätter zu verschiedenen Ufersicherungsarten mit Pflanzen fertiggestellt und veröffentlicht ([http://ufersicherung.baw.de/de/fuer\\_die\\_praxis/kennblaetter/index.html](http://ufersicherung.baw.de/de/fuer_die_praxis/kennblaetter/index.html)). Mit dem 2015 fertiggestellten Weißdruck des DWA-Merkblattes M519 „Technisch-biologische Ufersicherungen an großen und schiffbaren Gewässern“ (DWA, 2016), in das durch Mitwirkung von Vertretern des Forschungsprojektes bis dahin vorliegende Erkenntnisse eingeflossen sind, steht ein erstes auf der sicheren Seite liegendes Bemessungskonzept für Ufersicherungen unter Verwendung von Pflanzen auf der Grundlage des aktuellen Wissenstandes zur Verfügung.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Das Monitoring im Rahmen des Naturversuchs am Rhein wird zunächst bis 2016 weitergeführt. Dann werden alle Ergebnisse ausgewertet und in einem Abschlussbericht dokumentiert. Die einzelnen technisch-biologischen Bauweisen werden - unter Berücksichtigung von aktuellen Erfahrungen in anderen Wasserstraßenabschnitten - technisch und ökologisch bewertet. Zusammen mit den Erkenntnissen aus den bisherigen und ab 2016 vorgesehenen Labor- und Modellversuchen und aus den ersten Erfahrungen mit der Anwendung des DWA-Merkblattes M519 können 2017 für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung Anwendungs- und Bemessungsempfehlungen für technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen erarbeitet werden. Insgesamt wird das Forschungsvorhaben voraussichtlich noch 2 Jahre in Anspruch nehmen.

Laufzeit des Vorhabens: 2004 bis 2017.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

- BAW, BfG, WSA (2015): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, 4. Zwischenbericht, Monitoringergebnisse 2014, 31.07.2015
- Behrendt, K., Fleischer, P., Koop, J. (2015): Erste Ergebnisse eines Naturversuchs mit technisch-biologischen Ufersicherungen am Rhein bei Worms, KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2015 (8), Nr. 12
- DWA (2016): Technisch-biologische Ufersicherungen an großen und schiffbaren Gewässern, DWA-Merkblatt M519, Weißdruck erscheint Anfang 2016
- Eisenmann, J. (2015): Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen, Untersuchungen zur geotechnischen Standsicherheit, Dissertation, Universität für Bodenkultur (Boku) Wien, 2015

## **Filterstabilität grober Gesteinskörnungen**

**Netzplan-Nr.:** A39520470001

**Projektleiter:** Dr.-Ing. J. Stein, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** juergen.stein@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Eine Standard Bauweise zur Sicherung der Böschungsufer an den Bundeswasserstraßen ist die Schüttung loser Wasserbausteine auf einem Kornfilter. Um eine langfristige Deckwerksstabilität zu gewährleisten, muss die Körnungslinie des Kornfilters auf die Größe der Deckwerkssteine abgestimmt sein. Der feinkörnige Filter darf nicht durch Kontakterosion in die Poren der Deckschicht eindringen. Gleichzeitig muss er den darunter anstehenden Boden zurückhalten.

Die hydraulischen und mechanischen Vorgänge bei der Durchströmung der Deckwerke, verursacht durch die Wellenbelastung aus der Schifffahrt, sind weitestgehend unbekannt und sollen mit diesem FuE Vorhaben untersucht werden. Mit Hilfe der Erkenntnisse sollen die aus der Literatur bekannten Filterregeln auf sehr grobe Gesteinskörnungen erweitert oder ggf. neue Regeln formuliert und auf die Bemessung von Filterstufen für die Wasserbausteinklassen der TLW (2003) angewendet werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Deckwerke sind ein großes Anlagevermögen der WSV. Durch die Ergebnisse der Untersuchungen soll die Bemessung der Deckwerke optimiert und die Unterhaltungsaufwendungen minimiert werden. Mit den Untersuchungen können die Einflüsse aus Wellen, Absenk und den daraus entstehenden Porenwasserdrücken schematisch nachgestellt werden. Die Entwicklung eines neuen und auf die groben Gesteinskörnungen angepassten Berechnungsansatzes zur Bemessung der Kornfilter gegen Kontakterosion führt zu einer sichereren und wirtschaftlicheren Durchführung von Baumaßnahmen und einer Reduzierung von Unterhaltungsaufwendungen an den Bundeswasserstraßen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen ist die Erforschung der hydraulischen und mechanischen Prozesse in Filter und Deckschicht an den Ufersicherungen der Binnenwasserstraßen. Im ersten Versuchsstadium soll gezeigt werden, in wie weit in einem großmaßstäblichen Modellversuch mit einem realitätsnahen Deckwerk eine Abbildung der welleninduzierten Strömungsprozesse und Deckwerksverformungen möglich ist. Darauf aufbauend sollen Filterregeln für sehr grobe Gesteinskörnungen entwickelt und auf die Bemessung neuer Filterstufen für die neuen Wasserbausteinklassen der TLW (2003) angewendet werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Zur Erfassung der komplexen Strömungsverhältnisse und der daraus resultierenden Deckwerksverformungen werden wirklichkeitsnahe Modellversuche auf dem BAW Gelände durchgeführt. Bei einem Versuch wird ein Deckwerk bestehend aus Wasserbausteinen mit darunter liegendem Kornfilter in den Probekasten eingebaut. Der Deckwerksaufbau entspricht einer Standardbauweise nach MAR (2008). Dieser wird in einem Tauchbecken auf dem BAW Gelände zur Simulation der Strömungs- und Wellenbelastung mit Hilfe eines Mobilkrans zyklisch auf und ab bewegt. Beim Eintauchen und Ziehen des Kastens werden der Filter und die Deckschicht durchströmt. Es wird sowohl filterstabiles als auch nicht filterstabiles untersucht.

Zur Erfassung der periodischen Änderungen der Drücke und Strömungsgeschwindigkeiten ist das Deckwerk in mehreren Ebenen mit Porendruckgebern, Erddruckkissen und Sonden zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit bestückt. Zur Begutachtung der Verformungen und Umlagerungen hat der Probekasten Sichtfenster. Er kann an zwei Seitenwänden geöffnet werden. Die Setzungen der Deck-

werksoberfläche und Änderungen der Lagerungsdichte werden nach einer festgelegten Anzahl von Tauchzyklen bestimmt.

### 3 Ergebnisse

In 2015 wurden die Messungen von 5 Versuchen ausgewertet. Bei allen Versuchen war ein 70 cm dickes Deckwerk aus 40 cm Wasserbausteinen CP<sub>90/250</sub>, unterlagert von einer 30 cm dicken Filterschicht, eingebaut. Als Filter wurde ein Feinsplitt 2/16 mm, ein Grobsplitt 16/32 mm und Kies 2/63 mm verwendet. Bei jeder Versuchsserie wurde der Versuchskasten 100-mal zyklisch eingetaucht. Nach 10, 20, 30, 70 und 100 Tauchzyklen wurden die Änderungen der Lagerungsdichten, die Oberflächensetzungen und die Eindringung des Filters in die Deckschicht bestimmt. Die Strömungsgeschwindigkeiten, Porenwasserdrücke und Tauchtiefen wurden kontinuierlich aufgezeichnet.

Bei allen Versuchen konnten Verformungen in Form von Kontakterosion und Oberflächensetzungen mit unterschiedlicher Ausprägung beobachtet werden. Das Deckwerk mit dem feinkörnigsten Filtermaterial aus Splitt 2/16 mm versagte vollständig. Der Splitt filtrierte mit steigender Zyklenzahl in die Matrix der Wasserbausteine (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Gleichzeitig sanken die Wasserbausteine in die Filterschicht bis auf den Boden des Versuchskastens ein. Beim Grobsplitt war ein geringes Maß von Kontakterosion zu beobachten. Der weitgestufte Kies war stabil und zeigte nur minimale Verformungen.



*Bild 1: Deckwerksaufbau Versuch 3 bei Versuchsbeginn (li.), kollabiertes Deckwerk nach 70 Tauchvorgängen mit in die Deckschicht filtriertem Splitt 2/16 (re.)*

Bild 2 zeigt die Änderung der Lagerungsdichte in Filter und Deckschicht. Die Werte wurden mit Hilfe der Tauchwägungen ermittelt. Zum direkten Vergleich sind die Ergebnisse des filterstabilen Kies und des kollabierten Feinsplitts dargestellt. Beim Versuch mit Feinsplitt zeigt sich mit Zunahme der Tauchzyklen eine deutliche Zunahme der Lagerungsdichte in der Deckschicht durch das Eindringen des Filtermaterials. Auch in der Filterschicht findet eine Verdichtung statt. Für alle Versuche wurden die Verformungen mit Hilfe der Artecscans, Fensterfotos und Tauchwägungen ausgewertet und dargestellt.

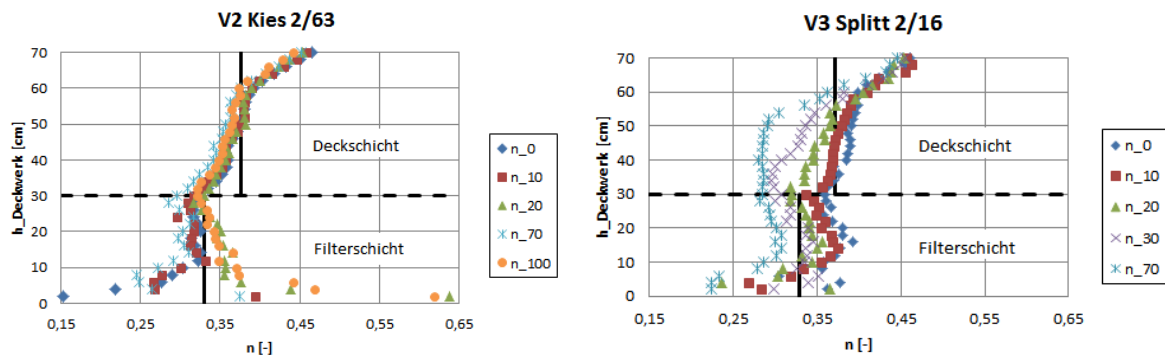


Bild 2: Auswertung der Tauchwägung, Änderung der Lagerungsdichte  $n$  über die Tauchzyklen, Kies 2/63 stabil mit geringer Zunahme von  $n$  (li.), große Instabilität durch Kontakterosion zwischen Filter- und Deckschicht (re.)

Die Auswertung wurde fortgeführt und mit theoretischen Ansätzen aus der Literatur verglichen. Die Eintauchgeschwindigkeiten des Probekastens, welche der Belastung des Deckwerks entspricht, wurden ermittelt und die Strömungsgradienten im Filter aus den Messungen berechnet (Bild 3). Die Filtergeschwindigkeiten wurden mit Hilfe der Delftsonden und Porendruckgeber ausgewertet. Zur Beschreibung des Strömungsverhaltens wurden die Reynolds bestimmt. Aus Bild 3 ist der Unterschied der hydraulischen Gradienten im Filter bei den verwendeten 3 Filtermaterialien ersichtlich.

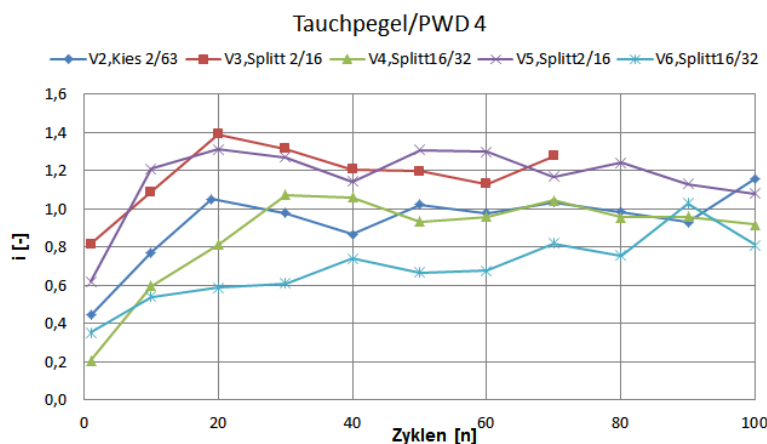


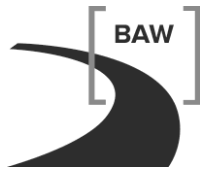
Bild 3: Hydraulischer Gradient im Filter für die 3 Filtermaterialien beim Eintauchvorgang mit steigender Zyklenzahl

Eine Parameterstudie mit Variation verschiedener physikalischer Parameter und Durchführung einer Dimensionsanalyse zur Bestimmung von maßgebenden Einflussfaktoren wird derzeit durchgeführt. Auf Grundlage der Auswertung der zeitlichen Änderung der Messergebnisse während der Belastungsfolge und Abgleich mit den Verformungen soll ein Erosionskriterium erstellt werden. Dafür wurden Kennwerte in Anlehnung an das Shields-Diagramm bestimmt und dargestellt. Für die hier untersuchten Materialien müssen die Grenzen für den Bewegungsbeginn des Sohlmaterials nach Shields neu ermittelt werden.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Um die Versuchsergebnisse zu verifizieren sind weitere Versuche mit den verwendeten Materialien vorgesehen.

- 2016:
- Durchführung weiterer Modellversuche
  - weitere Auswertung der Versuchsergebnisse und Erstellung eines Erosionskriteriums
  - ggf. Formulierung von weiterem Entwicklungsbedarf
  - Erstellung eines Abschlussberichtes



Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2016.

## **5 Literatur**

TLW 2003 Technische Lieferbedingungen Wasserbausteine, Ausgabe 2003: Bonn, 27. April 2004

## **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit**

**Netzplan-Nr.:** A39520470002

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. P. Fleischer, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** petra.fleischer@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Um die Standsicherheit technisch-biologischer Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen zu gewährleisten, müssen ihre Dauerhaftigkeit und die Belastbarkeit quantifizierbar sein. Es stellt sich die Frage, wie eine technisch-biologische Ufersicherung die Aufgabe eines rein technischen Deckwerks übernehmen kann: Eine Filterschicht wird benötigt, die den anstehenden Boden vor Erosion schützt. Daneben muss die Ufersicherung eine Lagestabilität gegenüber Strömungs- und Wellenangriff aufweisen. Die Böschung muss vor destabilisierenden Einwirkungen des u. U. auftretenden Porenwasserüberdrucks gesichert werden. So zielt die spezielle Fragestellung zum einen auf den Einfluss der technisch-biologischen Ufersicherung bzw. des durchwurzelten Bodens auf dessen Festigkeit, Erosivität und Durchlässigkeit ab. Zum anderen darauf, wie die technisch-biologische Ufersicherung die Böschung vor Versagensmechanismen schützen kann, die durch den Porenwasserüberdruck initiiert werden.

Grundlage sind unter anderem die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt A39520410151 (siehe unter <http://ufersicherung.baw.de/de/publikationen/vortraege/index.html>). Erfahrungen zu den von technisch-biologischen Ufersicherungen aufnehmbaren Fließgeschwindigkeiten bzw. Schubspannungen liegen bisher nur für kleine Fließgewässer ohne Schifffahrt vor (Gerstgraser, 2000; Rauch, 2006). Die Ergebnisse sind nur bedingt auf Wasserstraßen übertragbar.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

In der WSV kommt der Gewährleistung der Standsicherheit der Ufer große Bedeutung zu. Da die natürliche Ufergestaltung von Binnenwasserstraßen mit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie zunehmend an Bedeutung gewinnt, sollen verstärkt technisch-biologische Ufersicherungen zur Anwendung kommen. Für technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen gibt es derzeit noch keine allgemeinen Bemessungsregeln. Die Untersuchungen sollen in Verbindung mit den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt A39520410151 eine Grundlage für die Entwicklung von Bemessungsregeln für technisch-biologische Ufersicherungen bieten.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen ist die theoretische und modelltechnische Erforschung der Wirkung technisch-biologischer Ufersicherungen hinsichtlich geotechnischer und hydraulischer Aspekte. Quantifizierungen der Belastungsresistenz technisch-biologischer Ufersicherungen gegenüber schiffsinduzierten hydraulischen Einwirkungen sollen stattfinden. Mit Hilfe von theoretischen Betrachtungen soll eine weitere Grundlage für Standsicherheitsnachweise geschaffen werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Hauptuntersuchungsmethoden sind Modell- und Laborversuche: Die Untersuchungen der geotechnischen Aspekte beinhalten die für die Standsicherheit der Uferböschung maßgebenden Festigkeitsparameter des durchwurzelten Bodens. Auch der sich unter Absink ausbildende Porenwasserüberdruck, der u. a. von der Durchlässigkeit des Bodens abhängt, ist Untersuchungsgegenstand. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erosionsstabilität des durchwurzelten Bodens unter Wellen- bzw. Strömungsangriff. Unter den hydraulischen Aspekten wird die Reduktion von Strömungsgeschwindigkeiten und Wellenhöhen durch ingenieurbologische Ufersicherungen erfasst.



In dem Wellenbecken der BAW (Bild 1) können großmaßstäblich Wellenbelastungen auf eine Uferböschung aufgebracht und technisch-biologische Bauweisen, wie z. B. Weidenspreitlagen oder vorgefertigte Elemente wie Vegetationsmatten, getestet werden. Einwirkungen wie Wellenhöhen, Absunkwerte, sich ausbildender Porenwasserüberdruck, lokale Strömungsgeschwindigkeiten werden gemessen und Widerständen wie z. B. der Scherfestigkeit der Boden-Wurzelmatrix gegenüber gestellt.

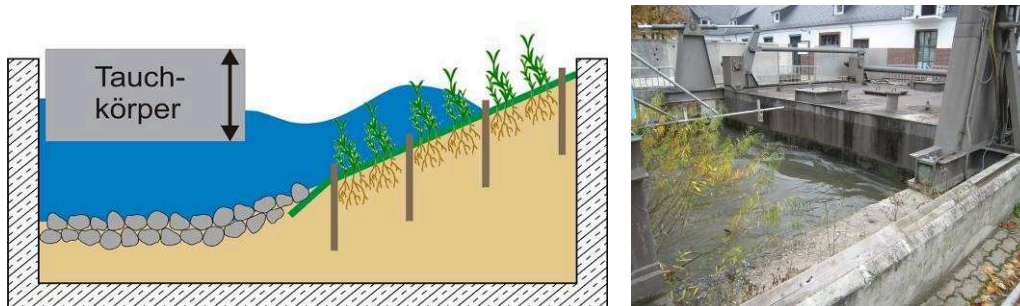


Bild 1: Systemskizze und Foto des Wellenbeckens mit einer technisch-biologischen Ufersicherung

### 3 Ergebnisse

2012 wurden Modellversuche mit Weidenspreitlagen als Ufersicherung im Wellenbecken der BAW auf einer 1:3 geneigten Böschung durchgeführt. Die 2011 eingebauten Spreitlagen aus Korb- und Purpurweiden wurden in 7 Messkampagnen nach einer Anwachszeit von 53, 63, 66, 70, 73 und 77 Wochen in mehreren Zyklen hydraulisch durch Wellen und Absunk belastet. Dabei wurde die Belastungsintensität langsam gesteigert. Eine Vielzahl von Messgrößen wurde aufgenommen. Im April 2013 wurde zum Abschluss der Versuchsserie mit den Weidenspreitlagen eine Dauerbelastung über mehrere Stunden mit maximal möglichen Einwirkungen durchgeführt. Die Spreitlagen konnten alle Belastungen ohne größere Schäden aufnehmen.

Parallel zu den Modellversuchen erfolgten Untersuchungen zum Wurzelwachstum der Weiden und zum Einfluss verschiedener Geotextilien auf das Wurzelwachstum. Dabei wurde festgestellt, dass sich bereits nach einer Vegetationsperiode ein relativ dichtes Wurzelwerk im Boden entwickelt. Nahe der Bodenoberfläche bildet sich ein sehr feines, fast flächiges System von Wurzeln, das vor Erosion schützen kann. Weiterhin zeigte sich, dass ein Kunststoffgeotextil mit 300 g/m<sup>2</sup> Flächengewicht die Wurzelbildung nicht behindert. Das Schafwollvlies (450 g/m<sup>2</sup>) hatte sich dagegen im Zeitraum von ca. 10 Monaten fast vollständig biologisch abgebaut. Aufgrund des sehr schnellen Abbaus ist es als temporärer Filter an Wasserstraßen nicht geeignet.

Um die Standsicherheit der Uferböschung mit Spreitlagen in Abhängigkeit vom Wurzelwachstum beurteilen zu können, wurde die Korrelation zwischen dem Durchwurzelungsgrad und der Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens untersucht und quantifiziert. Dazu wurden im März 2012 Weidenspreitlagen (Purpur- und Korbweide) in einzelnen 1 m hohen Versuchskästen mit einer Grundfläche von 50 cm x 50 cm eingebaut. Die Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens war nach 6 und 12 Monaten in verschiedenen Tiefen unter der Bodenoberfläche im Großscherversuch zu ermitteln (Bild 2). Vorher wurden umfangreiche Versuche im Großschergerät mit verschiedenen Böden ohne Wurzeln zur Festlegung der Versuchsdurchführung und -auswertung durchgeführt. Für die spezielle Fragestellung waren bauliche Veränderungen am Gerät erforderlich.

2013 wurden an den vorgezogenen Weiden Scherversuche in jeweils 3 verschiedenen Tiefen (15 cm, 45 cm und 75 cm unter der Oberfläche), separat für Purpur- und Korbweide, durchgeführt. Zur Ermittlung der Scherfestigkeitsparameter des durchwurzelten Bodens erfolgte das Abscheren bei verschiedenen Normalspannungen (25 kPa, 50 kPa, 75 kPa und 100 kPa).



**Bild 2:** Versuchskästen zur Anzucht von Weidenspreitlagen für Scherversuche

Parallel wurde jeweils die Wurzelmasse pro Volumeneinheit bestimmt. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Durchwurzelungsgrad und Scherfestigkeit des Bodens wurde festgestellt. Mit zunehmender Tiefe unter der Oberfläche nehmen der Durchwurzelungsgrad und analog dazu auch die Scherfestigkeit des Bodens ab.

Alle Versuchsergebnisse wurden 2014 ausgewertet. Darauf basierend konnten erste Standsicherheitsnachweise für technisch-biologische Ufersicherungen entwickelt werden. Eine auf den Untersuchungsergebnissen basierende Dissertation „Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen – Untersuchungen zur geotechnischen Standsicherheit“ wird Anfang 2015 von Frau Eisenmann an der Universität für Bodenkultur Wien eingereicht.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Forschungsprojekt wird 2016 mit der Erstellung des Abschlussberichtes auf der Grundlage der Dissertation (Eisenmann, 2015) beendet.

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2016.

#### 5 Literatur

- Gerstgraser, C. (2000): Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern - Grundlagen zu Bau, Belastbarkeit und Wirkungsweisen. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag
- Rauch, H.-P. (2006): Hydraulischer Einfluss von Gehölzstrukturen am Beispiel einer ingenieurbiologischen Versuchsstrecke am Wienfluss. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien. Band 63. Guttmann-Peterson

#### 6 Veröffentlichungen

- Eisenmann, J., Fleischer, P. (2012): Möglichkeiten und Grenzen pflanzlicher Ufersicherungen an Wasserstraßen. Johann-Ohde-Kolloquium, BAW-Mitteilungen Nr. 95
- Eisenmann, J. (2015): Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen, Untersuchungen zur geotechnischen Standsicherheit, Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien



## **Erosion von Dichtungstonen und bindigen Böden unter Strömungsbelastung**

**Netzplan-Nr.:** A39520470003

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. (FH) A. Schneider, Abteilung Geotechnik,  
Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

**E-Mail:** achim.schneider@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

Mit Einführung der überarbeiteten ZTV-W, LB 210 im Jahr 2006 wurden gleichzeitig die Richtlinie zur Prüfung mineralischer Weichdichtungen im Verkehrswasserbau (RPW) zur Prüfung der Eignung von Erdstoffen zur Verwendung als Dichtungsbaustoff verankert. Zum Nachweis der Erosionsstabilität sind in dieser Richtlinie der Zerfallsversuch nach Endell und der Pin-Hole-Test aufgeführt. Für beide Verfahren gelten bisher keine wissenschaftlich abgesicherten Ausschlusskriterien. Ähnlich gelagerte Anwendungsfälle bzw. Materialuntersuchungen, z. B. aus dem Deponiebau liefern aufgrund der stark unterschiedlichen Einbausituation (Unter-Wasser-Einbau, Strömungsbelastung durch Schifffahrt bzw. auf Gewässersohlen) keine hinreichend übertragbaren Bewertungskriterien. Eindeutige und reproduzierbare Kriterien sind jedoch besonders im Hinblick auf länderübergreifende Ausschreibungsverfahren unerlässlich, um bei der Vergabe entsprechender Baumaßnahmen nachvollziehbare und gerichtlich nicht angreifbare Kriterien zur Verfügung zu stellen.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Eine Prognose zum Erosionsverhalten bindiger Böden ist bei vielen geotechnischen und hydraulischen Fragestellungen eine notwendige Eingangsgröße zur Beurteilung der Auswirkungen der hydraulischen Belastungen auf den hiervon betroffenen Boden. Ebenso ist die labortechnische d. h. versuchstechnische Abbildung dieses Verhaltens eine nicht hinreichend gelöste Fragestellung. Aus der Literatur sind einige Ansätze wie der Zerfallsversuch nach Endell (Endell et al., 1939) und auch der Pin-Hole-Test nach British Standards ASTM (2006) bekannt. Beide Versuche sind in Deutschland nicht genormt. Auch ist über die versuchsspezifischen Anwendungsgrenzen im Hinblick auf die zu untersuchenden Böden und bezüglich der Grenzwerte der möglichen hydraulischer Belastungen wenig bekannt. Eventuell wird es erforderlich sein, neue und besser geeignete Tests und Untersuchungsverfahren zu entwickeln.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Neben der Notwendigkeit eindeutiger Materialparameter für eine konfliktfreie Vergabepraxis ist die Frage nach der Erosionsstabilität von Dichtungsbaustoffen auch vor den Hintergrund immer enger werdender Haushaltsmittel beim Bau neuer bzw. bei der Unterhaltung vorhandener Wasserstraßen zu betrachten. Zukünftig kann es erforderlich werden, vorhandene Kanalstrecken mit höheren Schiffsgrößen bzw. Abladetiefen als ursprünglich geplant zu beanspruchen. Es ist zu befürchten, dass die dabei auftretenden höheren Strömungsbelastungen in bisher ungedichteten Kanalstrecken abhängig von der Erosionsneigung des ungeschützten bindigen Sohlmaterials bzw. der Tondichtungen zu Schäden führen. Um dieses Schadenspotenzial besser einschätzen zu können, sind entsprechende Kenntnisse und Untersuchungen zur Erosionsneigung der im Sohlbereich anstehenden Böden unerlässlich.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchungen ist die Definition einfacher Versuchsmethoden zur Beschreibung des Erosionsverhaltens bindiger Böden, mit denen es möglich sein soll, reproduzierbare Parameter zu ermitteln.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Zur Verifizierung und zur Feststellung der Reproduzierbarkeit der bisher verwendeten Versuche ist vorgesehen, im geotechnischen Labor der BAW Karlsruhe mehrere unterschiedlich plastische Böden, vordergründig Dichtungstone, hinsichtlich Zerfall und Erosionsstabilität nach den bisherigen Testver-

fahren der RPW zu untersuchen. Hierzu sind Reihenuntersuchungen zur Optimierung der Versuchsparameter wie z. B. Einwirkdauer, Strömungsgeschwindigkeit, Probengröße etc. erforderlich. Sollte sich keine oder eine nicht ausreichende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse abzeichnen, so werden die Untersuchungen auf die Ermittlung des Einflusses weiterer möglicher Parameter (Mineralbestand etc.) ausgedehnt. Werden nach einer eventuellen Modifikation d. h. Verbesserung der Untersuchungsweise auch weiterhin keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt, folgt eine Erweiterung der Arbeiten auf die Entwicklung neuer Testverfahren. In diesem Zusammenhang wird beabsichtigt, das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart mit entsprechenden Überströmversuchen zu beauftragen, da dort bereits aus vorhergehenden Studien eine entsprechende Versuchsanlage vorhanden ist.

### 3 Ergebnisse

- 2011 wurden erste Überströmversuche als Vorversuche am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart durchgeführt.
- 2012 folgten in der BAW erste Vorversuche zum Zerfallsverhalten und zur Materialveränderung bzw. zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.
- 2013 und 2014 wurden weitere Versuchsreihen (Zerfallsversuche nach Endell) mit Variation des Lagerwassers und der Materialfestigkeit ( $c_U$ -Festigkeit) durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Art des umgebenden Lagerwassers (demineralisiertes Wasser oder gewöhnliches Leitungswasser) sowie die der Grad der Wasserentlüftung (Entgasung durch Kochen oder Vakuumentlüftung) die Zerfallsneigung des untersuchten Tones beeinflusst. Eine reproduzierbare Quantifizierung dieser Faktoren war jedoch nicht möglich. Für die weiteren Untersuchungen wurde festgelegt, nur bei Atmosphärenbedingungen entgastes Leitungswasser (Lagerzeit 12 bis 16 Stunden) zu verwenden. Beim zeitlichen Verlauf der Zerfallsentwicklung wurde festgestellt, dass schon eine geringe Änderung der Raumtemperatur das Messergebnis sehr stark beeinflusst und dass bei fehlender Temperaturkompensation der Messwaagen eine entscheidende Fehlerquelle darstellte. Daher wurden die laufenden Versuchsreihen unterbrochen und Waagen mit entsprechender Genauigkeit bzw. Temperaturkompensation beschafft.
- Die anschließend in 2015 durchgeführten Versuchsreihen ergaben dann deutlich geringere Schwankungsbreiten.

Neben den Untersuchungen zum Zerfall wurden in 2015 umfangreiche Umbauarbeiten an der vorhandenen Pin-hole-Anlage vorgenommen, Testversuche durchgeführt und Testversuche mit der modifizierten Versuchsanlage durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit der modifizierten Anlage deutlich verbessert werden konnte.

Ergänzend wurde zahlreiche Literatur zum Zerfall von Tonmaterial und zum Verhalten bei Durchströmung (Pin-Hole-Versuch) recherchiert. Eine Bewertung der Quellen steht noch aus.

Bedingt durch die umfangreiche und höher priorisierte operative Projektarbeit des Bearbeiters müssen die Arbeiten an dem Forschungsthema in 2015 etwas zurückgestellt werden. Da dies auch in 2016 so sein wird, ist beabsichtigt, die Untersuchungen zum Zerfallsverhalten der Dichtungsmaterialien im Rahmen einer Masterarbeit fortzuführen, die vom Bearbeiter des Forschungsprojektes fachlich begleitet wird.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016:

- Durchführung und evtl. Abschluss der Laboruntersuchungen zum Zerfall im Rahmen einer Masterarbeit
- Auswertung der Literaturrecherche
- Auswertung und Vergleich der Messergebnisse
- Eventuell Erweiterung des Versuchsprogramms auf andere Testverfahren
- 2017 Endbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2017 (beantragt).

## **5 Literatur**

- Endell, K., Loos, W., Breth, H. (1939): Zusammenhang zwischen kolloidchemischen sowie bodenphysikalischen Kennziffern bindiger Böden und Frostwirkung. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Band 16, Volk und Reich Verlag, Berlin
- ASTM D4647 (2006): Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08 ASTM International, West Conshohocken, PA, p.11.

## **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Bemessung korrodierter Stahlspundwände im Wasserbau**

**Netzplan-Nr.:** A39550110158

**Projektleiterin:** Dipl.-Geol. A. Heeling, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1)

**Bearbeiterin:** Dipl.-Ing. (FH) A. Jakobs, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1)

**E-Mail:** anne.heeling@baw.de, angelika.jakobs.baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Beurteilung des Korrosionszustandes einer Stahlspundwand erfolgt anhand der charakteristischen Werte der Korrosion „Mittlere Abrostung“ (→ Spannungsnachweis) und „Maximale Abrostung“ (→ Durchrostung), die sich derzeit zuverlässig nur mittels einer statistischen Auswertung von Ultraschall-Restwanddickenmessungen ermitteln lassen. Das Referat Geotechnik Nord hat dazu bereits in den 90er Jahren ein Verfahren zur Berechnung der Maximalen Abrostungen entwickelt.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Spundwände überbrücken Geländesprünge in Häfen und an Wasserstraßen und stellen daher ein im Zuständigkeitsbereich der WSV weit verbreitetes Bauteil dar, das wegen seiner statischen Funktion ständig hinsichtlich Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit zu beurteilen ist. Viele Spundwandbauwerke erreichen jedoch aufgrund lokaler Durchrostungen nicht die ursprünglich geplante Nutzungsdauer von 50 bis 80 Jahren. Darüber hinaus gibt es wirtschaftliche Bestrebungen „schlankere“, statisch höher ausgelastete Spundwandprofile einzusetzen, so dass eine Verminderung der Tragfähigkeit aufgrund korrosiver Wanddickenverluste von großer Relevanz ist.

Der zutreffenden Beurteilung des Korrosionszustandes auf Grundlage von Restwanddickenmessungen kommt somit eine hohe Bedeutung zu. Diese sind jedoch zeit- und kostenintensiv: Sie erfordern eine exakte Planung in Kenntnis der Örtlichkeiten. Die Vorbereitung (sorgfältige Reinigung der Messpunkte) und die Durchführung von Spundwanddickenmessungen erfolgen oft unter schwierigen Randbedingungen (Tauchereinsatz, strömendes bzw. trübes Wasser, Messeinsatz nahe intensiv genutzter Anlagen und bei Wellengang). Zudem gibt es zur Auswertung von Spundwanddickenmessungen auf dem freien Markt keine Standardsoftware; die BAW verwendet deshalb als Eigenentwicklung die Datenbankanwendung WaDiMe (= Wand-Dicken-Messung).

Für die WSV ist es von besonderem Interesse, den Aufwand bei der Durchführung von Restwanddickenmessungen zu verringern bzw. deren Aussagekraft zu vergrößern. Bisher werden Spundwanddickenmessungen von der BAW im Auftrag der WSV mittels Ultraschall durchgeführt. Zukünftig kann für bestimmte Ämter – mit Unterstützung der BAW – auch eine selbstständige Durchführung und Auswertung der Messungen oder eine Vergabe an (bisher auf dem freien Markt kaum vorhandene) qualifizierte Ing.-Büros sinnvoll sein.

Aus wirtschaftlicher Sicht wäre es zudem vorteilhaft, zukünftig das Abrostungsverhalten einer Spundwand aus Umgebungsparametern prognostizieren zu können.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das im Referat Geotechnik Nord erarbeitete Verfahren zur Berechnung der Mittleren Abrostung, welches auf Grundlage von Restwanddickenmessungen eine qualifizierte Beschreibung des Korrosionszustandes eines Spundwandbauwerkes zulässt, ist kontinuierlich weiterzuentwickeln. Dazu ist es auch erforderlich, das Vorgehen bei der Durchführung von Spundwanddickenmessungen mittels Ultraschall weiter zu optimieren sowie alternative Messverfahren zu testen.

Mittels statistischer Verfahren ist die Vorhersage des Abrostungsverhaltens aus einer Vielzahl von Einflussfaktoren zu ermöglichen:

- Physiko-chemische Eigenschaften des Immersionsmediums Wasser
- Physiko-chemische Eigenschaften des Spundwandstahls
- Mechanische Beanspruchung des Bauwerkes (z. B. Fenderreibung, Eisgang, Wellen)
- Mikrobiologische Prozesse

Einzelne Faktoren wirken jedoch nicht einheitlich korrosionsfördernd oder –hemmend, sondern stehen miteinander in Wechselwirkung. Ziel des FuE-Vorhabens ist deshalb ein tieferes Verständnis der Korrosionseinflussfaktoren und –mechanismen und deren Wechselwirkungen.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind in Form von anwenderfreundlichen Auswerteroutinen in die Datenbankanwendung WaDiMe einzubinden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Das FuE-Vorhaben unterstützte das Projekt „Design Method for Steel Structures in Marine Environments Including the Corrosion Behaviour“ der EU, das von der BAW bis 2005 gemeinsam mit Partnern aus Italien, Luxemburg und Frankreich durchgeführt wurde. Die Untersuchungsmethoden wurden detailliert im Endbericht (European Communities, 2007) beschrieben.

Die WaDiMe-Programme wurden zwischen 2007 und 2014 weiterentwickelt. Die Programmierarbeiten wurden von Fa. Skill Networks, Hamburg, durchgeführt.

Es wurden alternative Verfahren zur Spundwanddickenmessung, die lt. Herstellerinformationen jeweils keine oder nur eine geringere Reinigung der Messstellen erfordern, auf ihre Praxistauglichkeit hin geprüft und bewertet

- In Zusammenarbeit mit der Fa. Applus RTD, Bochum, wurden Wanddicken-Vergleichsmessungen mittels Ultraschall und pulsierendem Wirbelstrom im Labor (2006) und vor Ort (2007 und 2008) durchgeführt.
- In Zusammenarbeit mit der Fa. Evologics, Berlin, erfolgten 2009 Vergleichsmessungen im Labor zur Beurteilung der Aussagekraft und Praxistauglichkeit des Ultrabreitbandsonar-Verfahrens.
- In Zusammenarbeit mit der Fa. Domeyer GmbH & Co. KG, Bremen (Cygnus-Vertriebs Händler für Deutschland) wurde 2014 das speziell für den Tauchereinsatz entwickelte Gerät „Cygnus Dive“ der Fa. Cygnus Instruments, Dorchester (GB), zur Unterwasser-Ultraschall-Schichtdickenmessung mittels Mehrfachecho im Labor und vor Ort getestet.

## 3 Ergebnisse

Das ECSC-Projekt lieferte folgende Ergebnisse, die detailliert dem Endbericht (European Communities, 2007) zu entnehmen sind:

- In Zusammenarbeit mit der Fa. Statsoft Europe GmbH, Hamburg, wurde ein modifiziertes Berechnungsverfahren für die charakteristischen Kennwerte der Korrosion und ein Prognosemodell vorgelegt, wonach sich Mittlere Abrostungen mittels einer tiefenbezogenen Exponentialfunktion darstellen lassen:

$$\text{Mittlere Abrostung} = b_n \cdot e^{b_m \cdot \text{Tiefe}}$$

- Die Regressionskoeffizienten  $b_n$  und  $b_m$  lassen sich je Korrosionszone sowohl aus den Restwanddickenmessungen als auch aus Milieuparametern berechnen; die Tiefenangabe bezieht sich auf die jeweilige Korrosionszone definierenden Wasserstände.
- Um die Aussagekraft von Spundwanddickenmessungen zu erhöhen, wurde deren Durchführung aus statistischer Sicht hinterfragt und modifiziert. Es wurden Empfehlungen zur erforderlichen Anzahl von Einzelmesswerten pro Korrosionszone und Bauwerk sowie zur Verteilung und Anzahl der Messquerschnitte längs der Höhe einer Spundwandbohle gegeben.
- Es wurde festgestellt, dass die bei Spundwanddickenmessungen beobachteten Löcher häufig keinen (statistischen) Bezug zu den gemessenen Restwanddicken haben. Diese „anormalen“ Löcher lassen sich deshalb (im Gegensatz zu den „normalen“) weder mittels einer statistischen Analyse aus den gemessenen Restwanddicken prognostizieren noch dürfen sie bei der Berechnung der statistischen Kennwerte der Korrosion berücksichtigt werden.

Diese Ergebnisse wurden auf folgenden Fachtagungen vorgestellt:

- 2005: BAW-Kolloquium „Erfahrungsaustausch zur Planung, Bemessung und Ausführung von Uferwänden aus Stahlspundbohlen“,
- 2006: 31th PIANC Congress in Estoril, Portugal,
- 2007: HTG-Kongress in Dresden,
- 2009: Workshop „Spundwände – Profile, Tragverhalten, Bemessung, Einbringung und Wiedergewinnung“ der TU Hamburg-Harburg und
- 2010: Fachtagung „Bauwerksdiagnose 2010“ in Berlin.

2008 wurde das WaDiMe-Programmpaket vollständig überarbeitet und benutzerfreundlicher gestaltet. Seitdem wurden zahlreiche Fehlerkorrekturen und Anpassungen durchgeführt. 2013 erfolgte die Umstellung auf Windows 7 und Office 2010 sowie 2013 - 2014 eine Plausibilisierung der Datenbankinhalte.

2006 wurde erstmalig eine Installation des WaDiMe-Programmpaketes an eine externe Stelle – das WSA Minden – zur selbstständigen Durchführung und Auswertung von Spundwanddickenmessungen weitergegeben; in diesem Zusammenhang wurde bereits 2004 eine zweitägige Schulung durchgeführt.

Nachdem die Laborvergleichsmessungen zwischen Wirbelstrommessung, Verfahren Incotest, und Ultraschall 2006 eine gute Übereinstimmung bzgl. der Bestimmung der Mittleren Abrostungen erwarten ließen, die vor-Ort-Vergleichsmessungen 2007 aber zu widersprüchlichen Ergebnissen führten, ergab eine erneute Messkampagne 2008, dass aufgrund der Messungenauigkeit des Incotest-Verfahrens unter realen Einsatzbedingungen keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden können. Maximalen Abrostungen konnte verfahrensbedingt von vornherein nicht erwartet werden.

Labormessungen zeigten 2009, dass das Ultrabreitbandsonar-Verfahren der Fa. Evologics erwartungsgemäß (da es sich ebenfalls um ein auf Ultraschall basierendes Verfahren handelt), zutreffende Restwanddickenwerte liefert. Weitere 2010 geplante vor-Ort-Vergleichsmessungen scheiterten an den unzureichenden Kapazitäten der Fa. Evologics.

2014 wurden Labor- und vor-Ort-Vergleichsmessungen mit dem Mehrfachecho-Ultraschall-Messgerät Cygnus Dive durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird die Laufzeit einer Gruppe von drei aufeinanderfolgenden Spundwand-Echos ausgewertet: Das erste Echo, welches durch eine evt. vorhandene Rost- oder Farbschicht beeinflusst wird, wird ignoriert; die Wanddicke wird automatisch aus dem zweiten Echo ermittelt. Da die Tests bzgl. Reproduzierbarkeit der Messwerte, Aufwand und Handhabung ausnahmslos positiv verliefen, wurde das Gerät für die BAW angeschafft und wird seitdem erfolgreich eingesetzt.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Damit Wanddickenmessungen von den Wasser- und Schifffahrtsämtern vermehrt an Ingenieurbüros vergeben werden können, wird derzeit eine detaillierte Beschreibung zur fachgerechten Durchführung und Auswertung von Ultraschall-Messungen erarbeitet, die dann als Ausschreibungsgrundlage für Wanddickenmessungen dienen kann.

Laufzeit des Vorhabens: 2001 bis 2016.

#### **5 Literatur**

European Communities (2007): Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. Final report. ECSC Steel RTD program. Contract number 7210-PR/317. Final report.

#### **6 Veröffentlichungen**

-/-

## **Deckwerksanalyse mit der Distinct Element Method (DEM)**

**Netzplan-Nr.:** A39550170270

**Projektleiterin:** Dipl.-Ing. L. Petzoldt, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1),

**E-Mail:** livia.petzoldt@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Kenntnisse über Schädigungsmechanismen und Widerstände von Deckwerken gegenüber hydraulischen Belastungen sind für eine wirtschaftliche Bemessung von Deckwerken in der WSV unverzichtbar. Für die komplexen und vielfältigen Randbedingungen in den Ästuarien sind die derzeitigen Bemessungsgrundlagen unzulänglich. Das Ziel ist, mit Hilfe numerischer Verfahren die Widerstände von Deckwerken gegenüber hydraulischen Belastungen für die jeweiligen lokalen Randbedingungen im Tidegebiet zu erfassen und eine sichere sowie wirtschaftliche Deckwerksbemessung zu ermöglichen.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Bemessung von Deckwerken erfolgt derzeit auf Grundlage von Erfahrungswerten und physikalischen Modellansätzen (z. B. Hansen (1985), GBB (2010), EAK (1993 u. 2002)). Durch kleinmaßstäbliche Modellversuche und Beobachtungen in der Natur wird auf die Widerstandsfähigkeit des Deckwerks gegenüber den hydraulischen Einwirkungen geschlossen, wobei die Interaktion Seeschiff – Deckwerk bisher nur unzureichend untersucht wurde.

Bisher erfolgte eine Zusammenführung von Einwirkungen und Widerständen auf Grundlage der Finite Elemente Methode (FEM), wobei jedoch nur eine Massenbetrachtung angestellt werden kann. Bei einer numerischen Simulation des Deckwerks mit der DEM können sich die einzelnen Partikel hingegen „frei“ bewegen und unterliegen keinen finiten Begrenzungen. Eine Simulation mit der DEM hat bisher nicht stattgefunden, da die DEM in der Geotechnik derzeit vorwiegend für Grundlagenforschungen verwendet wird und die Methode mit vergleichsweise langen Rechenzeiten einhergeht. In der letzten Zeit finden erste Hochschulaktivitäten auf diesem Gebiet statt, jedoch häufig nur mit zweidimensionalen Betrachtungen, anderen Simulationsalgorithmen und dem derzeitigen Augenmerk auf der Schnittstellenproblematik.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

In der WSV werden im Rahmen der Unterhaltung und des Neubaus große Mengen an Deckwerkssteinen als Ufersicherung eingebaut. Eine Bemessung von Deckwerken und Buhnen im Tidebereich ist häufig mit Unsicherheiten verbunden. Mitunter treten Deckwerksschäden auf, deren Ursachen nicht einhellig geklärt sind.

Durch eine numerische Analyse der lokalen Randbedingungen, d. h. hydraulische Belastung (Tide, Wind- und Schiffswellen, Grundwasserpotentiale), Bodenaufbau, Filtermaterial, Deckwerkssteine (Form, Größe, Masse) und Deckwerksdicke, kann die Ermittlung der Stabilität des Deckwerks mit oder ohne Verklammerung verbessert werden und eine individuelle Bemessung erfolgen. Aufgetretene Schäden können durch die numerischen Simulationen auf verursachende Mechanismen zurückgeführt werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Mit Hilfe numerischer Verfahren soll die Widerstandsfähigkeit von Deckwerken gegenüber hydraulischen Belastungen für die jeweiligen lokalen Randbedingungen im Tidegebiet erfasst und eine integrierte Bemessung ermöglicht werden. Schädigungsmechanismen sollen auf Grundlage der Simulationen hergeleitet werden. Die numerischen Ergebnisse werden an Beobachtungen sowie Messungen in der Natur und im Modell sowie an Erfahrungswerten validiert.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Deckwerkssteine können in ihrer Form, Größe und Masse mit der DEM (hier PFC3D 5.0 Particle Flow Code) weitgehend realistisch abgebildet werden (Bild 1). Durch die dreidimensionale Betrachtung werden alle Freiheitsgrade der Deckwerkssteine wirklichkeitsnah simuliert. Die hydraulischen Einwirkungen (Wellen und Strömungen) werden mit einem CFD-Add-on (hier CCFD - Coupled Computational Fluid Dynamics) erfasst. Zur ganzheitlichen Modellierung der Interaktion Wasser und Deckwerk werden die Programme PFC3D und CCFD miteinander gekoppelt.

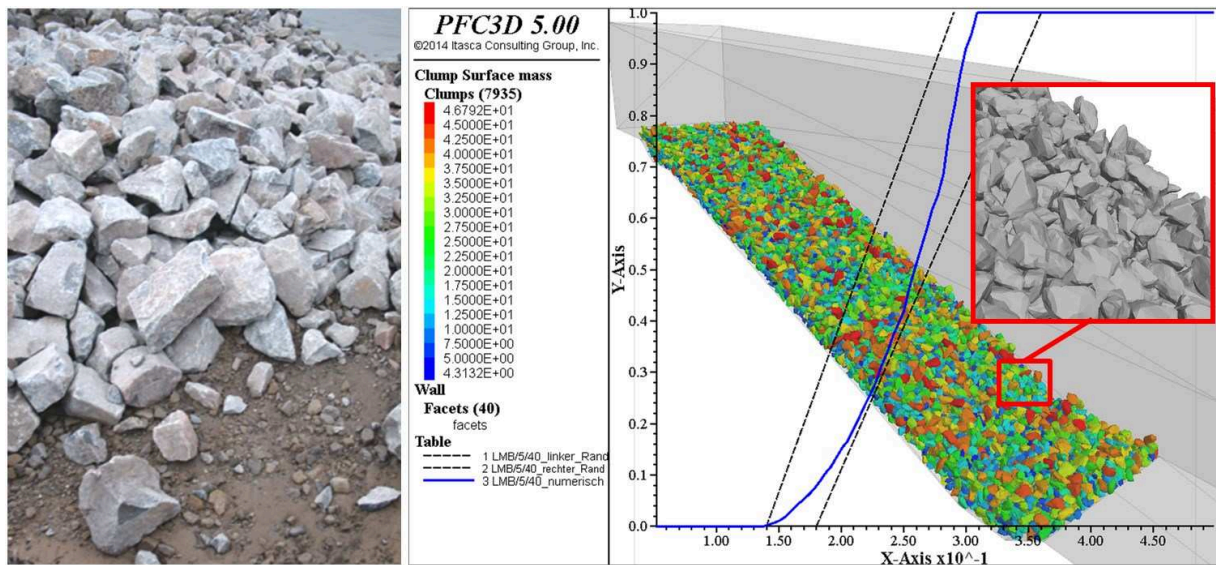


Bild 1: reale Deckwerkssteine (Beispiel), generiertes Deckwerk LMB<sub>5/40</sub> und dazugehörige Summenkurve im numerischen Modell

Die numerischen Parameter für die Deckwerkssteine werden mittels physikalischer Modellversuche in der großen hydraulischen Rinne der BAW-DH kalibriert. Dazu wurde ein Abschnitt mit losen Deckwerkssteinen durch eine böschungsparelle Strömung beansprucht. Steinverlagerungen wurden messtechnisch und visuell erfasst, um die Messergebnisse im numerischen Modell simulieren zu können.

Des Weiteren erfolgt die Plausibilisierung der Ergebnisse des numerischen Modells anhand von Messungen und Beobachtungen in der Natur und Erfahrungswerten. Hierzu werden ergänzende Feldmessungen der hydraulischen Einflussgrößen am Deckwerk durchgeführt und eine videometrische Aufnahme der Wellenbilder vorgenommen. Weiterhin wird ein Messsystem weiterentwickelt, bei dem reale Deckwerkssteine mit Beschleunigungs- und Drehratensensoren sowie mit Drucksensoren instrumentiert sind. Die so instrumentierten Deckwerkssteine wurden in bestehenden Deckwerken sowie bei den Modellversuchen in Kombination mit Strömungs sonden und Wasserdruckaufnehmern eingebaut. Über die Messung der Beschleunigung und Lageänderung infolge der hydraulischen Belastungen soll auf die wirkenden Kräfte rückgerechnet werden. Im numerischen Modell werden das hydraulische Ereignis und die resultierenden Beschleunigungen/Kräfte an den Deckwerkssteinen simuliert.

Die Bearbeitung des FuE erfolgt in Kooperation mit der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau.

## 3 Ergebnisse

2015 lag das Hauptaugenmerk auf der Fortführung der Feldmessungen, der Auswertung der umfangreichen Messdaten aus den Feld- und Rinnenversuchen sowie der Weiterentwicklung des instrumentierten Deckwerkssteins und der gekoppelten DEM-CFD-Simulation.



Für die Schaffung einer Datengrundlage zur Validierung der numerischen Modellierung anhand von Feldmessungen wurden die Wellen- und Strömungsmessungen unter Einsatz zweier autarken Sonden in exponierter Lage auf der Elbinsel Lühesand im ersten und zweiten Quartal 2015 im Rahmen einer Projektbearbeitung fortgeführt. Parallel dazu wurden Messungen mit jeweils fünf instrumentierten Deckwerkssteinen in-situ im bestehenden Deckwerk vorgenommen. Die gewonnenen Messdaten der autarken Sonden und der instrumentierten Deckwerkssteine wurden ausgewertet. Aus den Ergebnissen sind Abhängigkeiten der Steinbewegungen im Deckwerk von Wellenauflauf, Strömungsregime und Tidewasserstand erkennbar.

Weiterhin wurden die Daten der Versuchsreihen in der hydraulischen Rinne ausgewertet. Die auftretenden Steinverlagerungen wurden messtechnisch via Laser und visuell mittels einer farblichen Markierung erfasst. Es zeigten sich Steinumlagerungen bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten ab etwa 1,6 m/s (Bild 2). Die in den Modellversuchen gemessene Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit sowie die Verlagerung der Deckwerkssteine konnten im gekoppelten numerischen Modell abgebildet werden.

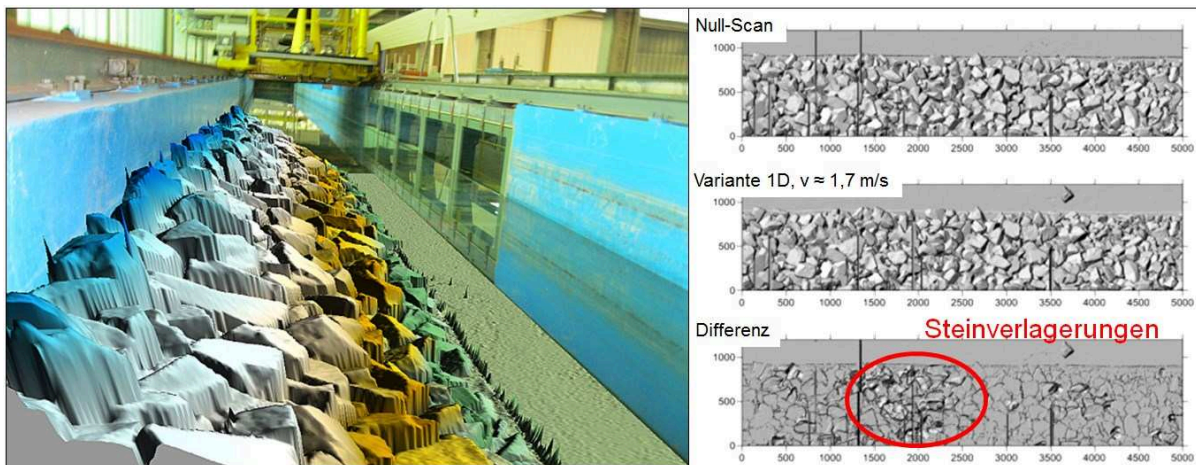


Bild 2: Rinnenversuche: Erfassung der Steinverlagerungen mittels Laser

Auf der Seite der numerischen Modellierung ist die realistische Abbildung eines gesamten Deckwerkes in PFC3D entsprechend der Größen- bzw. Massenverteilung jeder Wasserbausteinklasse möglich. Die Generierung der im Forschungsvorhaben zu simulierenden Deckwerke der Wasserbausteinklassen CP<sub>90/250</sub>, LMB<sub>5/40</sub> und LMB<sub>10/60</sub> ist abgeschlossen. Bei der hydraulischen Modellierung sollen die Messdaten der Feldversuche als Eingangswerte zur Simulation von Schiffswellen im Modell verwendet werden. Die realitätsnahe Simulation schiffserzeugter Wellen im Modell wird weiter präzisiert und auf den 3D-Fall erweitert.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016: Abschließende Auswertung und Simulation der physikalischen Modellversuche, Kalibrierung der numerischen Deckwerkssteine, Fortführung der Datenanalyse und numerische Simulation der Feldversuche, Ereignisse und Reaktionen, Weiterentwicklung und Kalibrierung der Simulationsmodelle, Weiterentwicklung des Messsystems instrumentierter Deckwerksstein

2017: Verfassen des Abschlussberichts und abschließende Arbeiten

Laufzeit des Vorhabens: 2008 bis 2017 (beantragt).

#### 5 Literatur

-/-

## 6 Veröffentlichungen

- Mittelbach, L.; Pohl, M. (2012): Böschungsdeckwerke unter Wellenbelastung. „Johann-Ohde-Kolloquium“, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, BAW-Mitteilungen Nr. 95, Seite 41 - 47
- Mittelbach, L. (2013): Numerical Simulation of Rip-Rap with the Distinct Element Method, AIP Conf. Proc. 1542, Seite 1178 – 1181, doi: 10.1063/1.4812147
- Mittelbach, L., Pohl, M., Schulze, P., Konietzky, H. (2014): Numerical Simulation of Rip-Rap Revetments in Tidal Areas. Die Küste, Heft 81, Westholsteinische Verlagsanstalt Boysens & Co., Heide i. Holstein, Seite 119 – 132

## **Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen**

**Netzplan-Nr.:** A39550170318

**Projektleiter:** Dr.-Ing. T. Nuber, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1)

**E-Mail:** thomas.nuber@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

Die Deichabdeckung weicht in Abhängigkeit des Deichbaumaterials, der Einbaubedingungen, der Bodenstrukturbildung (Risse, Bioturbation, Alter), Einbauten, des Zustands der Grasnarbe, der Zeit und Höhe des hydraulischen Ereignisses, vorhergehender meteorologischer Ereignisse sowie der Aufsättigung des Deichkerns unterschiedlich stark auf. In Verbindung mit Erosionsprozessen kann aus dem Wellenangriff und Wellenüberlauf an der geschwächten Deichabdeckung ein Deichversagen resultieren. Der Einfluss aller Faktoren und die jeweiligen Abhängigkeiten sollen im Feld bzw. im Labor ermittelt und in einem numerischen Modell zusammengeführt werden. Durch die Verwendung eines numerischen Modells, können sich Versagensmechanismen frei entwickeln und sich überlagernde physikalische Phänomene zusammen berücksichtigt werden.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Ausbildung von Deichen geschieht derzeit auf der Grundlage von Erfahrungswissen sowie physikalischen Modellansätzen und analytischen Gleichungen. Analytische Nachweisführungen bestehen für verschiedene einzelne Versagensmechanismen. Derzeitig werden einzelne Aspekte für die Widerstandsfähigkeit von Deichen unabhängig voneinander untersucht, wie z. B. die Rissentwicklung, der Einfluss der Grasnarbe auf den Erosionswiderstand sowie die Erosion des Deichbaumaterials. Aus den Untersuchungen werden Empfehlungen und analytische Ansätze abgeleitet. Einzelne ungekoppelte numerische Verfahren zur Simulation von morphodynamischen und hydraulischen Prozessen werden verwendet.

Eine ganzheitliche Betrachtung aller Aspekte findet derzeit nicht statt. Durch eine numerische mechanisch-hydraulisch gekoppelte Modellierung eines Deichquerschnittes mit seinen charakteristischen Eigenschaften (Deichbaumaterial, Bodenstruktur, Jahreszeit, Grasnarbe) unter der Einwirkung eines hydraulischen Ereignisses (Sturmflut, Starkregen, Einwirkungsdauer) ist eine Bemessung möglich, die alle Versagensmechanismen beinhaltet. Deichschäden und potentielle Gefährdungsbereiche können über eine Parametervariation ermittelt und Deichverstärkungsmaßnahmen bewertet werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Für den Festlandschutz sind funktionstüchtige und widerstandsfähige Deiche gegenüber den Einwirkungen aus Sturmfluten - vor dem Hintergrund eines säkularen Meeresspiegelanstiegs - unerlässlich. Im Rahmen der Unterhaltung von Bundeswasserstraßen fallen große Mengen an Baggergut an. In Kenntnis des säkularen Meeresspiegelanstiegs sind Deichverstärkungsmaßnahmen erforderlich. Die Entnahme von Klei und Mergel ist häufig mit rechtlichen und ökologischen Schwierigkeiten versehen, so dass sich die Verwendung von Baggergut als Deichbaumaterial anbietet. Zur Bewertung zu verstärkender Deichquerschnitte mit Baggergut (Kubatur, Zusammensetzung) auf bestehenden Klei- oder Mergeldeichen sollen physikalische und numerische Untersuchungen vorgenommen werden.

Beim Ausbau der Bundeswasserstraßen im Tidebereich werden Deichschäden sowie Schäden im Hinterland häufig auf die Ausbaumaßnahmen zurückgeführt. Durch eine numerische Simulation können auftretende Schäden und verursachende Mechanismen untersucht werden. Die Ursachen können benannt und somit verhindert werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Mit Feld- und Laboruntersuchungen sowie numerischen Simulationen sollen die Widerstände von Deichen (sowie Deichverstärkungen) den hydraulischen Belastungen gegenübergestellt werden und

somit letztendlich die Ermittlung der Widerstandsfähigkeit des Deiches inkl. der Ermittlung der Schwachstellen ermöglichen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Anhand von Untersuchungen an bestehenden Deichen sowie an einem neu zu errichtenden Deich unter definierten Bedingungen soll der Einfluss von Alterungsvorgängen (Strukturbildung) und Wasserbelastung auf die Scherfestigkeit sowie Durchlässigkeit der Deichabdeckung ermittelt werden. An einem neu zu errichtenden Deich unter definierten Bedingungen sollen Untersuchungen durchgeführt werden, um prinzipielle Aussagen zu erhalten und die sonst üblichen - durch Inhomogenitäten - auftretenden Streubreiten bei bestehenden Deichen zu reduzieren.

### Felduntersuchungen:

Zur Simulation von erhöhten (stationären) Wasserständen im Sturmflutfall wird auf der seeseitigen Böschung oder Deichkrone über geeignete Behälter eine Wasserauflast von bis zu 3 m erzeugt. Zu verschiedenen Zeitpunkten (nach 0 – 4 – 8 – 24 Stunden) werden Sonderproben über die Tiefe der Deichabdeckung entnommen. Diese werden anschließend im bodenmechanischen Labor untersucht. Während der Wasserbeaufschlagung werden die Infiltrationsraten protokolliert, wodurch die in situ Durchlässigkeiten unter Berücksichtigung der Strukturbildung ermittelt werden.

Zur Erfassung der zeitabhängigen Strukturbildung ist derzeit eine Versuchsdauer von 10 Jahren vorgesehen. In Beprobungsintervallen von 0 – 1 – 3 – 5 – 10 Jahren sollen zu den Jahreszeiten Herbst, Frühjahr und Sommer die o. g. Untersuchungen durchgeführt werden.

### Laboruntersuchungen:

Die entnommenen Sonderproben werden in Triaxialversuchen - mit dem durch die Feldversuche eingestellten Wassergehalt - dräniert, ohne back-pressure mit geringen Konsolidationsspannungen (10 - 30 - 60 kPa) abgesichert. Des Weiteren sind Kompressionsversuche mit Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit durchzuführen. Somit werden alle wassergehaltsabhängigen Parameter für eine spezifische Deichabdeckung für die numerische Modellierung ermittelt.

### Numerische Simulation:

Der Deichquerschnitt wird mit einem drei-dimensionalen Finite Differenzen Programm (FLAC3D) simuliert. Somit sind Berechnungen bei großen Dehnungen möglich, um Versagensmechanismen sowie deren Verlauf ermitteln zu können. Zur Erfassung der hydraulischen und bodenmechanischen Vorgänge wird die Simulation mechanisch-hydraulisch gekoppelt durchgeführt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven aus den Triaxial- und Kompressionsversuchen in Abhängigkeit der Dauer der hydraulischen Beanspruchung und weiterer Randbedingungen (Bodenart, Alter, ...) werden im Programm hinterlegt, um die Entwicklung der Scherfestigkeiten und Durchlässigkeiten realistisch zu erfassen. Somit wird die Aufweichung auch infolge Wassereinstau im Deichkern oder stärkerer Infiltrationen durch Sandnester oder Wühlgänge berücksichtigt. Eine Durchsickerung des Deiches gemäß dem Ereignis und eine Änderung der Gebrauchstauglichkeit / Standsicherheit sind das Ergebnis der numerischen Simulation. Inhomogenitäten des Deichbaumaterials und des unterlagernden Bodens können durch eine Gauß-Verteilung der Bodenkennwerte berücksichtigt werden. Die Grasnarbe wird durch entsprechende Parameterzuweisung der Netzbereiche simuliert. Erosionsvorgänge der Grasnarbe und der Deichabdeckung sollen durch Auflösen des Kontinuums im entsprechenden Bereich und dem Ersetzen durch ein Diskontinuum (PFC3D) simuliert werden.

## 3 Ergebnisse

Mit dem Programm FLAC3D wurde ein parametrisiertes Deichmodell für die Eingabe variabler Deichgeometrien erstellt. Eine lagegenaue sowie zeitabhängige Zuweisung von Bodenparametern entsprechend der Laborversuchsergebnisse durch hinterlegte Tabellen erlaubt die numerische Ermittlung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit. Mit diesem Modell wurden mechanisch-hydraulische gekoppelte Simulationen durchgeführt. Dabei wurden für die Deichabdeckungen die Stoffparameter verwendet, die sich aus den bisherigen Laborergebnissen ableiten lassen. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde das Modell weiterentwickelt und die in FLAC3D implementierten Stoffgesetze hinsichtlich ihrer Anwendungsgrenzen untersucht.

Weiter wurden im Oktober 2015 wiederholte Untersuchungen und Probenahmen an einem Neudeich aus Mergel in Dahme (Schleswig-Holstein) sowie erstmalig an einem Baggergutdeich in Bremen-Farge durchgeführt. Derzeit werden die Laboruntersuchungen an den neu gewonnen Proben durchgeführt. An den Probenahmestellen wurden jeweils zwei Infiltrationsversuche mit einer Dauer von 4 h und einer Dauer von 24 h durchgeführt. Nach Abschluss der Infiltrationsversuche wurden in der Mitte dieser Flächen sowie an einer Stelle, an der kein Infiltrationsversuch durchgeführt wurde, ungestörte Proben in verschiedenen Tiefen genommen.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016-17: Weiterentwicklung des numerischen Modells - Hinterlegung der Bodenzustandsparameter, Durchführung von Modellrechnungen und Parameterstudien mit dem numerischen Modell. Wiederholte Untersuchungen an bestehenden Deichen (Mergel, Klei, Baggergut). Verifizierung von derzeitigen analytischen Modellvorstellungen

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2017 (beantragt).

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

Nuber, T., Pohl, M. (2014): Geotechnical investigations on dike materials as a basis for a holistic numerical model. Proceedings of the South Baltic Conference in Dredged Materials in Dike Construction, 10-12 April 2014, Rostock

## **Störung des Baugrundes durch Kampfmittelsondierungen**

**Netzplan-Nr.:** A39550170362

**Projektleiterin:** Dipl.-Geol. A. Heeling, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1)

**E-Mail:** anne.heeling@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Im Vorwege einer Baumaßnahme ist die Kampfmittelfreiheit im Baufeld sicherzustellen. Die zur Kampfmittelsuche eingesetzten, überwiegend magnetischen und elektromagnetischen Sondierverfahren arbeiten selbst zwar zerstörungsfrei, erfordern aber häufig Aufgrabungen oder Bohrungen. Bei Tiefensondierungen wird die Messsonde dann vom Bohrloch aus eingesetzt. Das Bohrverfahren, das Erkundungsraster und die Erkundungstiefe werden vom Kampfmittelräumdienst (KRD) des jeweiligen Bundeslandes auf Grundlage länderspezifischer Verordnungen und Verwaltungsvorschriften und auch einzelfallbezogen nach dem Ermessen des Sachverständigen nach Sprengstoffgesetz (SprengG) festgelegt. Für den Bund gelten zudem eigene Vorgaben.

Hier kommt es zu einem Interessenkonflikt zwischen dem KRD einerseits und dem Bauherrn bzw. dessen Baugrundgutachter andererseits. Während der KRD für gesicherte Aussagen zum Kampfmittelverdacht ein möglichst enges Erkundungsraster benötigt, bedeutet die Kampfmittelsondierung mittels Bohrungen für den Bauherrn in erster Linie eine Störung des Baugrundes, die es aus geotechnischer Sicht zu begrenzen gilt.

Zum Ausmaß der durch Kampfmittelsondierungen verursachten Veränderung der Festigkeitseigenschaften des Baugrundes liegen derzeit keine gesicherten, belastbaren Informationen vor. Konkrete Informationen hierzu sind aber eine wichtige Grundlage für erdstatische Bemessungen, d.h. für die Dimensionierung von Bauteilen, und sind damit auch eine Argumentationsgrundlage in Besprechungen zwischen Bauherrn und KRD. Zudem können nur in Kenntnis der veränderten Festigkeiten Altaufschlüsse, die vor der Kampfmittelerkundung durchgeführt wurden, neu interpretiert werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Es obliegt dem Bauherrn, sich im Vorwege einer Baumaßnahme die Kampfmittelfreiheit des Baufeldes z.B. durch den KRD des jeweiligen Bundeslandes bescheinigen zu lassen. Für die WSV ergibt sich daraus folgende Problemstellung:

- Die Zuständigkeitsbereiche der einzelnen Wasser- und Schifffahrtsämter decken sich i.d.R. nicht mit den Grenzen der Bundesländer. Als Folge können für ein Bauprojekt größerer räumlicher Ausdehnung (z.B. die Vertiefung eines Kanals oder eines Flusses) mehrere KRDs zuständig sein, die dann für einzelne Baubereiche unterschiedliche Kampfmittelerkundungsprogramme auf der Grundlage unterschiedlicher Technischer Anleitungen festlegen. Zudem können bei Bundesliegenschaften neben länderspezifischen auch bundesspezifische Vorschriften gelten.
- Für Pfahlgründungen und Spundwände, die im Zuständigkeitsbereich der WSV häufig verwendete Bauteile sind, werden in den Technischen Anleitungen meist spezifische Anforderungen an die Kampfmittelsondierungen gestellt.
- In Kenntnis des zu erwartenden Baugrundes wird seitens des zuständigen KRD der sogenannte „Verdachtshorizont“ und damit die erforderliche Erkundungstiefe für die Kampfmittelsondierung festgelegt: in organischen oder bindigen Böden geringer Festigkeit ist auch in größeren Tiefen – lt. Hamburger TA Kampfmittelräumung bis 3 m unter deren Schichtunterkante – mit Bomben-Blindgängern zu rechnen. Solche Böden (z.B. Auelehm, Mudde, Klei) treten häufig gewässernah und damit im Zuständigkeitsbereich der WSV auf.
- Laut „Arbeitshilfen Kampfmittelräumung“ liegt *„bei Kriegsende von Soldaten oder Einheiten aufgegebene andere Munition (... Munition für Handfeuer- und Maschinenwaffen, Granaten,*

*Minen) ... nicht selten an verkehrsgünstiger Stelle in Flüssen oder Seen“ und damit im Zuständigkeitsbereich der WSV.*

Aus den Ergebnissen des FuE-Vorhabens können für die WSV Vorschläge zur Planung, Ausschreibung und Durchführung von Kampfmittelerkundungen erarbeitet werden, um den anstehenden Baugrund in seiner Tragfähigkeit möglichst wenig zu beeinträchtigen.

### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel dieses FuE-Vorhabens ist es, die durch die Kampfmittelerkundung entstandene Störung des Baugrundes, d.h. die Veränderung der Festigkeiten, qualitativ zu erfassen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Das FuE-Vorhaben wurde 2013 in enger Zusammenarbeit von der BAW und dem Hamburger Ingenieurbüro Knabe Enders Dührkop Ingenieure GmbH (KED), das über mehrjährige Erfahrung mit der Betreuung von Kampfmittelsondierungen verfügt, gemeinsam durchgeführt. Wegen der Geschäftsaufgabe von KED wurde 2014 mit dem Hamburger Ing.-Büro Fichtner Water & Wind GmbH ein neuer Kooperationspartner gefunden.

2013 wurden die Kampfmittelverordnungen der Länder und des Bundes hinsichtlich geotechnisch relevanter Anforderungen (Bohrverfahren, Rasterabstand, Erkundungstiefe, etc.) gesichtet und tabellarisch aufbereitet. Es geben jedoch nicht alle Bundesländer schriftliche Kampfmittelverordnungen heraus und in Absprache mit dem KRd sind auch abweichende Erkundungsverfahren zulässig.

2014 wurde deshalb mittels einer Fragebogenaktion bei KRds, Bohrfirmen und Flächeneignern (WSV, Hafenbetreiber) hinterfragt, in welcher Form Kampfmitteluntersuchungen in der Praxis tatsächlich am häufigsten durchgeführt werden. Gleichzeitig wurden im Zuständigkeitsbereich der WSV geeignete Testfelder sowie reale, zur wissenschaftlichen Begleitung geeignete Kampfmittelprojekte gesucht und gefunden.

Im Rahmen von Feldversuchen wird die Veränderung des Baugrundes als Folge einer Kampfmittelerkundung untersucht. Der Versuchsaufbau berücksichtigt die Einflussfaktoren *Baugrundtyp* (jeweils in unterschiedlichen Festigkeiten: nichtbindig über Grundwasser / nichtbindig unter Grundwasser / bindig), *Bohrraster* (0,5 m / 1,5 m / 3,0 m), *Bohrverfahren* (Hohlbohrschnecke / Bohrung mit glatter Verrohrung / zusätzlich seit 2015: Spülbohrung) und *Bohrlochverfüllung* (Bohrgut / Bentonit-Zement-Gemisch).

Für jeden Baugrundtyp wird auf Testfeldern die in-situ-Festigkeit des Bodens vor und nach einer simulierten Kampfmittelerkundung bestimmt. Jedes Testfeld repräsentiert eine Kombination der o. g. Bohrverfahren und Bohrlochverfüllungen.

Im September 2013 wurde auf dem von der Hamburg Port Authority betriebenen Spülfeld Ellerholz ein Feldversuch für den Baugrundtyp *„nichtbindiger Boden, über Grundwasser, locker bis mitteldicht gelagert“* bis in eine Tiefe von 3 m unter Spülfeldoberfläche durchgeführt. Die Vorher- und Nachherfestigkeiten wurde mittels Sondierungen mit der Leichten Rammsonde (DPL) bis in eine Tiefe von bis zu 4 m erkundet.

Im Juni 2015 wurde – unterstützt von der Planungsgruppe für den Ausbau des NOK – neben der Levensauer Hochbrücke westlich von Kiel der Baugrundtyp *„nichtbindiger Boden im Grundwasser, mitteldicht bis dicht gelagert“* mittels simulierter Kampfmittelbohrungen bis in eine Tiefe von 6 m durchteuft (Bild 1); die Vorher- und Nachherfestigkeiten wurden im Testfeld mittels Drucksondierungen (CPT) und im Bohrloch mittels DPL bestimmt.

Weitere Feldversuche sowie eine Begleitung geeigneter WSV-Projekte, bei denen eine Kampfmittelerkundung durchgeführt wird, sind in den kommenden Jahren geplant.

Mittels numerischer Simulation soll der Einfluss von Kampfmittelondierungen auf den Baugrund qualitativ abgeschätzt werden. Die Simulationsergebnisse sind an den Feldversuchen zu validieren.



Bild 1: *Feldversuch 2015 an der Levensauer Hochbrücke, NOK*

### 3 Ergebnisse

Als Ergebnis einer Sichtung der Kampfmittelverordnungen der einzelnen Bundesländer wurde eine Liste der geotechnisch relevanten Anforderungen erzeugt, die die Planungsgrundlage für die Feldversuche ist. Auf Grundlage der Fragebogenaktion wurde diese Liste 2014 überarbeitet.

Der Feldversuch vom September 2013 zeigt, dass bei Kampfmittelondierungen im nichtbindigen, locker bis mitteldicht gelagerten Boden über Grundwasser

- es sowohl zur Auflockerung als auch (bei einer Bohrlochverfüllung mit Bentonit-Zement-Gemisch) zur Verdichtung des Baugrundes kommen kann,
- der Einfluss der Bohrlochverfüllung größer ist als der des Bohrverfahrens und
- vermutlich eine Tiefenabhängigkeit besteht.

Der Feldversuch von 2015 ist noch nicht vollständig ausgewertet.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016/17: weitere Feldversuche  
numerische Simulation  
2018: zusammenfassende Auswertung

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2018.

### 5 Literatur

-/-

### 6 Veröffentlichungen

-/-



## **Bestimmung des Tragverhaltens von offenen Stahlrohrpfählen**

**Netzplan-Nr.:** A39550170378

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. M. Kidane, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1)

**E-Mail:** mussie.kidane@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Offene Stahlrohrpfähle werden in der WSV vornehmlich bei kombinierten Rohrspundwänden, Tiefgründungen im offenen Wasser sowie als Anlegedalben eingesetzt. Die Belastungsrichtungen variieren stark zwischen vorwiegend vertikal und vorwiegend horizontal. Des Weiteren werden offene Stahlrohrpfähle mit ähnlichen Durchmessern wie im Bereich der WSV als Gründungselemente von Offshore-Windenergieanlagen eingesetzt.

In der Fachwelt ist das Verständnis für das physikalische Verhalten von offenen Stahlrohrpfählen bei unterschiedlichen Durchmessern nur unzureichend erschlossen. Entsprechend unterscheiden sich beispielsweise Angaben in diesbezüglichen maßgeblichen Empfehlungen: die Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EAP) weichen deutlich von den Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen (EAU) ab. Diese führen zu unterschiedlichen rechnerischen axialen Pfahltragfähigkeiten, wodurch sich Unsicherheiten bei der Dimensionierung dieser Bauwerke ergeben.

Nachfolgende geotechnischen Inhalte sind in der derzeitigen wissenschaftlichen Diskussion und bedürfen einer näheren sowie systematischen Betrachtung, um Bauwerke wirtschaftlich und insbesondere sicher bauen zu können:

##### **Pfropfenbildung und innere Mantelreibung:**

Derzeitig wird oft davon ausgegangen, dass ab einem Rohrdurchmesser von ca. 1,5 m keine maßgebliche Pfropfenbildung im Pfahlinnern stattfindet sondern der Pfahl über innere und äußere Mantelreibung trägt. Das Auftreten eines Pfropfens innerhalb eines offenen Rohrpfales bei der Rammung verändert dessen Tragverhalten maßgeblich. Neben den Eigenschaften des anstehenden Bodens ist die aufgebrachte Rammenergie ein maßgebliches Kriterium für die mögliche Pfropfenbildung. Dies ist derzeit nur unzureichend erforscht.

##### **Anwachsen:**

Bei einigen dynamischen Pfahlprobelastungen konnte durch re-strikes (erneute Probelastung zu einem späteren Zeitpunkt) an Rohrpfählen mitunter eine zeitabhängige Zunahme der Tragfähigkeit beobachtet werden. Die Bandbreite reicht jedoch von 1- (keine Zunahme) bis etwa 2-facher Zunahme in ähnlichen Zeiträumen. Verlässliche Ergebnisse und Ansätze liegen nicht vor.

##### **Statische Pfahltragfähigkeit:**

Die rechnerisch eindeutige und zutreffende Prognose der statischen Pfahltragfähigkeit ist derzeit nicht möglich. Verschiedene Prognoseverfahren existieren zwar, jedoch wurden diese zum einen nur an wenigen Pfahlprobelastungen kalibriert und führen zum anderen oft zu unterschiedlichen Ergebnissen bei gleichen vorgegebenen Randbedingungen.

##### **Verhalten unter zyklischer Belastung:**

Das Tragverhalten und die Auswirkung zyklischer Lastamplituden auf das Boden- sowie das Boden-Pfahl-Verhalten sind derzeit nur unzureichend erforscht. Unterschiedliche Ansätze liegen vor, welche jedoch große Streubreiten in den Ergebnissen liefern und mitunter auf vergleichsweise geringer Datengrundlage basieren. Diese Thematik ist insbesondere für die Gründungselemente von Offshore-Windenergieanlagen von großem Interesse.

## 1.2 Bedeutung für die WSV

Erweiterte Kenntnisse zu den o.g. Punkten erlauben eine wirtschaftliche und sichere Bemessung von offenen Stahlrohrpfählen für WSV-Bauwerke sowie von Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen. (Die BAW unterstützt das BSH bei der Genehmigung von Offshore-Windenergieanlagen und Konverterplattformen mit ihrem Expertenwissen.)

## 1.3 Untersuchungsziel

Bemessungsmethoden zum Pfahltragverhalten sollen unter Berücksichtigung der vorgenannten physikalischen Zusammenhänge (siehe 1.1) ermittelt bzw. angepasst werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen von WSV-Baumaßnahmen soll der Rammvorgang von offenen Stahlrohrpfählen messtechnisch begleitet werden, um die Pfropfenbildung, die innere und äußere Mantelreibung, den Spitzenwiderstand sowie entstehende Porenwasserüberdrücke zu ermitteln. Die Begleitung soll an einer Modellfamilie bestehend aus Stahlrohrpfählen mit Durchmessern von etwa 70 cm, 150 cm und 250 cm erfolgen. Zusätzliche Drucksondierungen im Pfahlinnern sind vorgesehen.

Durch dynamische und statische Probelastungen soll das Tragverhalten ermittelt werden. Hierdurch wird zudem ein direkter Vergleich der Ergebnisse zur Tragfähigkeit aus verschiedenen Prognoseverfahren ermöglicht.

Zur Ermittlung von Anwachseffekten sollen dynamische Probelastungen zu späteren Zeitpunkten ( $t = 28 \text{ d}$ ,  $180 \text{ d}$ ) durchgeführt werden. Es sind darüber hinaus Labor- sowie Modellversuche auszuführen um Anwachseffekte unter definierten Bedingungen (Chemismus, Biologie, etc.) zu untersuchen. Hierbei besteht das Ziel darin, die Faktoren zu bestimmen, welche einen maßgeblichen Einfluss auf die Tragfähigkeitssteigerung von gerammten Rohrpfählen über die Zeit haben.

Der Einfluss aus zyklischen horizontalen Belastungen auf das Pfahltragverhalten soll durch hydraulische Pressen mit unterschiedlichen Lastzyklen sowie Amplituden simuliert werden. Dies kann bei entsprechenden Randbedingungen von Land aus erfolgen oder durch Setzen eines Reaktionspfahles. Die o.g. messtechnische Instrumentierung wird hierfür weiter verwendet und ggf. ergänzt. Durch die Nachrechnungen der Versuchsergebnisse mit derzeit gängigen, jedoch bisher nicht validierten Prognoseverfahren, sollen die vorhandenen Bemessungsmethoden zyklisch-lateral belasteter Pfähle verbessert werden.

## 3 Ergebnisse

In einer Literaturrecherche wurden Ergebnisse bisher durchgeführter statisch- sowie zyklisch-lateraler Pfahlprobelastungen gesichtet. Des Weiteren wurden vorhandene Bemessungsmethoden für lateral belastete Gründungspfähle den zugrunde liegenden Feld- sowie Laborversuchen gegenübergestellt, nach denen diese kalibriert worden sind.

Ergebnisse von Pfahlprobelastungen aus der Literatur, in welchen die zeitliche Traglastentwicklung gerammter Pfähle in axialer Richtung bestimmt wurde, wurden zusammengetragen. Mögliche Einflüsse auf die Tragfähigkeitssteigerung von Rohrpfählen wurden definiert. Laborversuche zur Untersuchung einzelner Einflüsse des zeitlich veränderlichen Pfahltragverhaltens wurden konzipiert. Die Geräteentwicklung für ein dahin angepasstes Rahmenschergerät wurde weiter geführt.

Die Durchführung des ersten Feldversuches zur Untersuchung der zeitlichen Tragfähigkeitsentwicklung und der Pfropfenbildung eines gerammten Rohrpfahles mit einem Durchmesser von 71 cm ist in Zusammenarbeit mit dem WSA Wilhelmshaven für März 2016 geplant.

Im Rahmen des Feldversuches wird die Spannungsentwicklung entlang der Innen- und Außenseite eines Rohrpfahles über Erddruckmessgeber gemessen (siehe Bild 1). Die Messungen sollen bei der Pfahlrammung sowie über einen Zeitraum von 1 Jahr danach kontinuierlich durchgeführt werden.

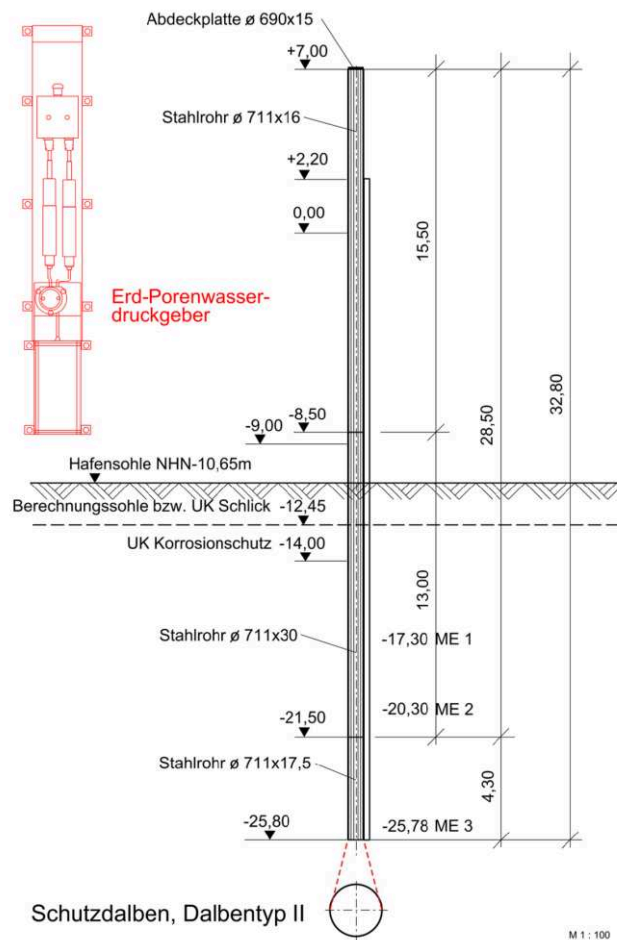


Bild 1: Positionierung der Erddruckmessgeber am Rohrpfahl

Um die zeitliche Tragfähigkeitsentwicklung zu bestimmen, sollen des Weiteren rambbegleitend sowie zu späteren Zeitpunkten dynamische Pfahlprobelastungen durchgeführt werden.

Um darüber hinaus während der Pfahleindringung, die Pfpfenbildung zu untersuchen, wird die Bodenoberfläche innerhalb des Stahlrohres mit Hilfe eines Lotes kontinuierlich gemessen.

Für die Instrumentierung der Messgeber, die Messwerterfassung und die Begleitung der dynamischen Probelastungen wurde das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig beauftragt.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2014-2017: Durchführung sowie Auswertung der Feldversuche und Durchführung der weiteren Forschungsinhalte

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2017.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen**

**Netzplan-Nr.:** A39530170002

**Projektleiter:** Dr. sc. techn. R. Weichert, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserstraße und Umwelt (W1)

**E-Mail:** roman.weichert@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei zahlreichen Wehr- und Stauanlagen, welche zur Gewährleistung der Schifffahrt und/oder zur Nutzung der Wasserkraft errichtet wurden, besteht die Notwendigkeit zur Ergänzung von funktionsfähigen technischen Fischaufstiegsanlagen, um die ökologische Durchgängigkeit wieder herzustellen. Dabei ist die Bedingung für die Funktionsfähigkeit einer Fischaufstiegsanlage, dass sie für die große Mehrzahl der für die betrachtete Fließgewässerregion relevanten Fischarten durchgängig ist. Zur Bemessung von Fischaufstiegsanlagen wird auf Erfahrungswerte zurückgegriffen, die in technische Bemessungsregeln einfließen. Die Bemessung hat das Ziel, eine Strömungssituation zu erzeugen, die den Fischen ermöglicht, ein vorhandenes Querbauwerk zu überwinden.

Bei Planung und Bau von technischen Fischaufstiegsanlagen existieren bereits umfangreiche Erfahrungen vor allem für kleine und mittlere Fließgewässer, welche in entsprechenden Regelwerken zusammengefasst sind. Solche Regelwerke beziehen sich auf Erfahrungswerte aus den verschiedenen Studien der letzten Jahrzehnte und beinhalten eine Sammlung geometrischer Parameterintervalle aus den positiv bewerteten Varianten dieser Studien. Eine systematische Untersuchung des Zusammenspiels dieser Parameter und deren Auswirkungen auf die Strömung steht jedoch aus. Darüber hinaus existieren auch bei der Übertragung des Stands der Technik auf die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen Unsicherheiten.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Das seit dem 1. März 2010 geltende Gesetz zur Neuregelung des Wasserrechts (WHG) verpflichtet die WSV zur Erhaltung oder Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an den Staustufen, die von ihr errichtet oder betrieben werden, soweit dies für die Erreichung der Ziele der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie erforderlich ist. Da die überwiegende Anzahl der WSV-Staustufen über keine ausreichend funktionsfähigen Anlagen verfügen, die die Fischwanderung und damit die Durchwanderbarkeit der Bundeswasserstraßen gewährleisten, wird an einer Vielzahl der Staustufen der Bau von Fischwechselanlagen bzw. deren Ertüchtigung erforderlich. Es besteht demnach in der WSV ein großer Bedarf, die vorhandenen Erfahrungen bei Fischaufstiegsanlagen für die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen zu prüfen und weiterzuentwickeln.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Projektes ist allgemeingültige, objektunabhängige Gesetzmäßigkeiten als quantitative Handreichung zur Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen an Bundeswasserstraßen zu erarbeiten. Das vorliegende FuE-Projekt beschäftigt sich mit dem Themenfeld der Passierbarkeit, d. h. mit den Verhältnissen innerhalb der eigentlichen Fischaufstiegsanlage. In dem hier beschriebenen FuE-Projekt liegt der Fokus auf dem sogenannten Schlitzpass, da dieser der am häufigsten eingesetzte Bautyp ist.

Im Rahmen des FuE-Projektes sollen die zugelassenen geometrischen Parameterintervalle vom Merkblatt DWA-M 509 systematisch untersucht werden, um derer Auswirkungen auf die Strömungseigenschaften in Schlitzpässen aufzuzeigen, insbesondere die Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsverteilung und Turbulenz innerhalb der Becken.

Die Untersuchungsergebnisse müssen später in fischbiologischer Hinsicht bewertet werden, um belastbare Bemessungsvorgaben abzuleiten. Dies ist derzeit wegen fehlender Ergebnisse aus Schwimmverhaltensuntersuchungen von Fischen nur eingeschränkt möglich, da der Einfluss unterschiedlicher

Strömungseigenschaften auf das Schwimmverhalten verschiedener Fischarten derzeit nur begrenzt zur Verfügung steht.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Die Auswirkung der Geometrie auf die Strömungseigenschaften wird mittels gegenständlicher Modelluntersuchungen ermittelt, in dem die relevanten Geometrievarianten eingebaut und untersucht werden. Da sowohl die entstehende Anzahl der Varianten als auch der zeitliche Aufwand der Messung einzelner Varianten groß sind, werden unterschiedliche Aspekte in unterschiedlichen gegenständlichen Modellen, mittels unterschiedlicher Messverfahren in Kooperation mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT (IWG) in zwei Teilprojekten parallel untersucht. Die Auswirkungen auf die Turbulenz werden im Teilprojekt 1 in Laborräumen der BAW durchgeführt, die Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsverteilung werden im Teilprojekt 2 in Laborräumen des IWG durchgeführt.

### **2.1 Teilprojekt 1: Untersuchungen zu Turbulenz**

Die Auswirkung der Beckengeometrie auf die Eigenschaften der Turbulenz (z. B. Skalen) wird in einem gegenständlichen Modell eines Schlitzpasses mit neun aufeinander folgenden Becken ermittelt. Die Sohlneigung des Modells ist auf 2,8 % fixiert, die Beckendimensionen sind 78,5 x 99,0 cm. Die Schlitzpasseinbauten sind flexibel anpassbar. Das Modell entspricht einem Maßstab von ca. 1:4 in Bezug auf die Verhältnisse der geplanten Fischaufstiegsanlagen am Neckar. Für Fließgeschwindigkeitsmessungen kommen die hochauflösenden Messverfahren PIV (Particle Image Velocimetry) und ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) zur Anwendung, die Wasserspiegellagen werden in jeweils einem Punkt oberhalb und unterhalb jeder Trennwand mit fest montierten akustischen Messsonden erfasst.

Um die Auswirkung des Sohlensubstrates auf die Hydraulik zu prüfen, kann der Boden des Fischpasses optional mit Halbkugeln von 50 mm Durchmesser bedeckt werden. Die PIV-Messungen müssen aus messtechnischen Gründen jedoch ohne Sohlsubstrat durchgeführt werden.

### **2.2 Teilprojekt 2: Untersuchung der Geschwindigkeitsverteilung**

Die Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung werden an einem gegenständlichen Modell eines Schlitzpasses mit sechs aufeinander folgenden Becken am IWG durchgeführt. Die Schlitzpasseinbauten sind als modulare Elemente installiert, um eine große Variabilität in Bezug auf die geometrischen Abmessungen der Becken und Schlitze zu ermöglichen. Die Sohlneigung des Modells ist variabel einstellbar.

Die Untersuchungen sind in 2 Untersuchungsbausteine (UB) aufgeteilt. Im Rahmen von UB1 werden die Strömungsmuster in den Becken mittels Langzeitbelichtung und parallel die Wasserspiegellagen und der Durchfluss aufgezeichnet. In UB2 erfolgt dann die Messung der Geschwindigkeiten mittels ADV.

## **3 Ergebnisse**

### **3.1 Teilprojekt 1**

Zur Untersuchung der Auswirkung der Sohlrauheit auf das vertikale Geschwindigkeitsprofil in Schlitzpässen wurden Versuche in einem weiteren Modell durchgeführt. Das Modell bestand aus einem Einzelschlitz von gleicher Schlitzweite wie in dem Schlitzpassmodell. Die Strömung hinter dem Einzelschlitz wurde bei drei unterschiedlichen Sohlrauheiten vermessen: glatte Sohle, Sohle aus kleinen und großen Halbkugeln. Dabei wurde die Wasserspiegeldifferenz am Schlitz so eingestellt, dass die maximale Geschwindigkeit mit der im Schlitzpassmodell gemessenen übereinstimmte. Die Messergebnisse bestätigen, dass die Strömung unterhalb des Schlitzes von dem Schlitz dominiert wird, sodass eine Auswirkung des Sohlensubstrats auf die Strömung nur in einer begrenzten unteren Schicht zu erfassen war.

Zur Analyse zeitaufgelöster PIV-Geschwindigkeitsdaten wurde die Methode „Proper Orthogonal Decomposition“ implementiert. Erste Tests wurden an einer PIV-Messung aus dem Schlitzpassmodell durchgeführt, eine detaillierte Auswertung steht jedoch noch aus.

### 3.2 Teilprojekt 2

In UB1 wurden zusätzlich 30 Geometrievarianten bei einer Neigung des Modells von 3,9 % untersucht.

Es wurde eine auf die Ergebnisse der Langzeitbelichtung von 90 verschiedenen Geometrievarianten begründete Definition der Strömungsmuster vorgenommen (siehe Bild 1).

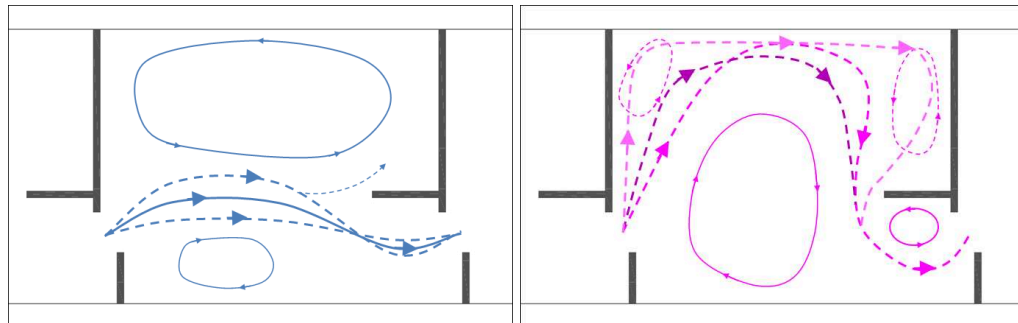


Bild 1: Definition Strömungsmuster 1 (SM1, links) und Strömungsmuster 2 (SM2, rechts)

Bei SM1 fließt die Hauptströmung in einer leichten Kurve von Schlitz zu Schlitz, wobei sich ober- und unterhalb der Hauptströmung Rückströmzonen ausbilden. Die Hauptströmung schwankt dabei kontinuierlich über eine gewisse Breite (gestrichelte Linien in Bild 1 links). Die Hauptströmung bei SM2 fließt durch das gesamte Becken entlang der Berandungen in den unterstromigen Schlitz. Dabei entstehen eine große Rückströmzone zwischen den Schlitzen und eine kleine unter der Leitwand vor dem unterstromigen Schlitz. Die verschiedenfarbigen Linien der Hauptströmung kennzeichnen verschiedene Varianten der Linienführung der Hauptströmung, die bei SM2 vorkommen kann.

Die Ergebnisse der Langzeitbelichtung (Tabelle 1) zeigen, dass nicht nur die Neigung  $S$  Auswirkung auf das SM haben. Besonders der Schlitzwinkel  $\alpha$  ist ausschlaggebend.

$S = 2,8 \%$		$B/L = 0,8$	$B/L = 0,75$	$B/L = 0,7$	$B/L = 0,65$	$B/L = 0,6$
$\alpha = 24^\circ$	$d = 0,038\text{m}$	SM1	SM1	SM1	T	T
	$d = 0,071\text{m}$	SM1	SM1	T	T	T
$\alpha = 39^\circ$	$d = 0,038\text{m}$	SM1	T	T	SM2	SM2
	$d = 0,071\text{m}$	SM1	SM1	T	T	SM2
$\alpha = 56^\circ$	$d = 0,038\text{m}$	SM2	SM2	SM2	SM2	SM2
	$d = 0,071\text{m}$	SM2	SM2	SM2	SM2	SM2

Tabelle 1: Ergebnisse der Langzeitbelichtung für eine Neigung von 2,8 %. ( $B/L$ : Breiten zu Längenverhältnis,  $\alpha$ : Schlitzwinkel,  $d$ : Geometriebeiwert,  $T$ : Transition)

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 4.1. TP1 (2016):**
- Optimierung und Auswertung der PIV-Daten
  - Ergebnissynthese und Dokumentation
- 4.2. TP2 (2016):**
- Weitere Auswertung der Ergebnisse aus Untersuchungsbaustein 1, Hydraulische Untersuchungen verschiedener Varianten mittels ADV
  - Optimierung der Auswertung der ADV-Daten
  - Ergebnissynthese und Dokumentation

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2016.

## **5 Literatur**

-/-

## **6 Veröffentlichungen**

Höger, V.; Henning, M.; Nestmann, F. (2015): Experimental study on flow patterns in vertical slot fishways. In: Fish Passage Conference, Groningen, The Netherlands. Vortrag im Tagungsband  
Sokoray-Varga, B., Weichert, R. Nestmann, F. (2015): Untersuchungen zu hydraulischen Berechnungsansätzen von Schlitzpässen. Wasserwirtschaft, Ausgabe 07-08/2015, Seite 61-66.

## **Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen**

**Netzplan-Nr.:** A39530170004

**Projektleiterin:** Dipl.- Ing. L. Deutsch, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserstraße und Umwelt (W1)

**E-Mail:** lisa.deutsch@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit unserer Fließgewässer sind funktionstüchtige Fischaufstiegsanlagen (FAA) an Stauanlagen unabdingbare Bausteine. Die Funktionsfähigkeit dieser FAA hängt in erster Linie von zwei Faktoren ab, der Auffindbarkeit und der Passierbarkeit. Das Thema der Auffindbarkeit einer Fischaufstiegsanlage beinhaltet die Fragestellung, ob wanderwillige Fische, die direkt bis in das Unterwasser einer Staustufe gelangen, in der Lage sind, den Einstieg in die FAA ohne größere Verzögerungen zu finden. Die besondere Herausforderung an Bundeswasserstraßen ist, dass die mit der Strömung aus der Fischaufstiegsanlage konkurrierende Strömung im Auslaufbereich des Kraftwerks bzw. des Wehrs so dominant ist, dass eine für den Fisch wahrnehmbare Leitströmung schwierig zu realisieren ist.

Die Schwerpunkte der bisher durchgeführten Forschungsarbeiten zur Auffindbarkeit von FAA sowie der aktuelle Stand des Wissens, der im Wesentlichen in DWA-M 509 (DWA 2014), im Handbuch Querbauwerke (Dumont et al. 2005) und in einigen internationalen Publikationen dokumentiert ist, sind bislang nur unzureichend auf die Randbedingungen an größeren Fließgewässern bezogen.

Wesentlich für eine Weiterentwicklung der Bemessungsstandards ist eine verbesserte Kenntnis über das artspezifische Wanderverhalten von Fischen. Da die Untersuchung dieser Fragestellung mit lebenden Fischen mit großem Aufwand verbunden ist, wird in einem ersten Schritt die hydraulische Optimierung der Strömungssituation im Unterwasser von Wehr- und Wasserkraftanlagen angestrebt.

Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Untersuchung der Einflüsse von unterschiedlichen Turbinencharakteristika und Betriebsmodi auf die Strömungsverhältnisse und somit auf die Konkurrenzsituation zur Fischpass-Leitströmung.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf die Möglichkeit durch ein geräumigeres Turbinen- und Wehrsteuerungsmanagement die hydraulischen Randbedingungen im Nahfeld der Fischaufstiegsanlage und somit die Auffindbarkeit zu verbessern.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Zuge der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie und der Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes fällt die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit und insbesondere des Fischaufstieges in den gesetzlichen Auftrag der WSV. Im Hinblick auf die Dringlichkeit der Maßnahmen und der großen Zahl von ca. 250 durchgängig zu gestaltenden Stauanlagen, besteht ein großes Bedürfnis nach neuen Erkenntnissen und daraus abgeleiteten Bemessungskriterien für FAA an Bundeswasserstraßen.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchung ist es, Kriterien abzuleiten, die es dem planenden Ingenieur erlauben, den Einstieg der Fischaufstiegsanlage und dessen Beaufschlagung für die Verhältnisse an den Bundeswasserstraßen zuverlässig zu gestalten und zu dimensionieren, sodass eine für den Fisch wahrnehmbare Leitströmung erzeugt und somit die kleinräumige Auffindbarkeit gewährleistet wird (AP 1). Des Weiteren sollen die Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf die Strömungsverhältnisse im Unterwasser von Stauanlagen identifiziert werden, um zum einen die Auffindbarkeit der Fischaufstiegsanlagen zu verbessern und zum anderen die bestehenden numerischen Modellierungen weiter-



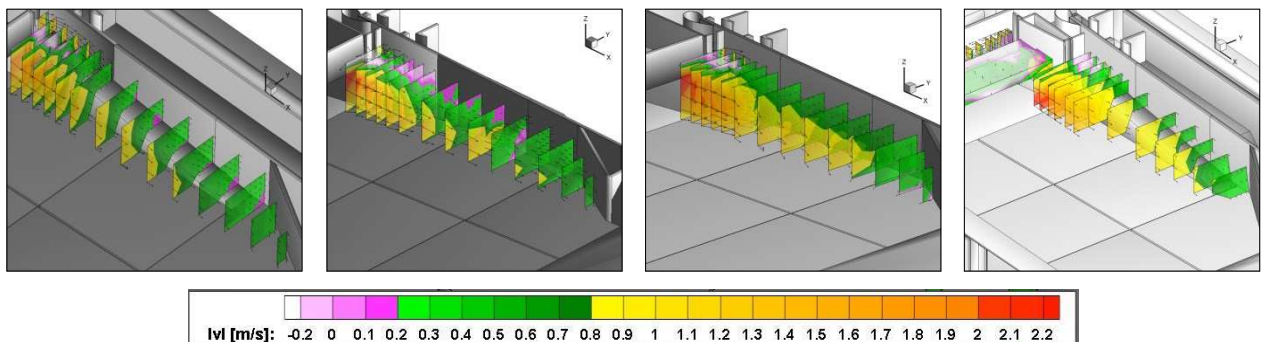
zuentwickeln (AP 2). Darüber hinaus sollen die Aus- und Wechselwirkung von Kraftwerks-, Wehr- und Schleusensteuerungen auf die hydraulischen Randbedingungen an Stauanlagen untersucht und Steuerungskonzepte zur Optimierung der Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen entwickelt werden (AP 3).

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungsmethoden orientieren sich an den jeweiligen Fragestellungen innerhalb der einzelnen Arbeitspakete. Mittels physikalischen Modelluntersuchungen werden der Einfluss von baulichen Veränderungen auf die hydraulischen Randbedingungen im Nahfeld von FAA (AP 1), die Beschreibung des Strömungsfeldes im Unterwasser einer Stauanlage für verschiedene Kraftwerksausgestaltungen (AP 2), sowie die Aus- und Wechselwirkungen von Kraftwerks-, Wehr und Schleusensteuerungen auf die hydraulischen Randbedingungen an Stauanlagen analysiert (AP 3). Numerische Modelluntersuchungen werden zur Betrachtung des Unterwasserbereichs der Stauanlagen bzw. des Kraftwerkes durchgeführt (AP 1, 2 und 3). Ebenfalls im Rahmen aller Arbeitspakete werden Naturmessungen mit ADV bzw. ADCP an den Pilotstandorten durchgeführt. Ergänzend kommen zur Betrachtung unterschiedlicher Einstiegsgestaltungen von FAA ethohydraulische Untersuchungen zum Einsatz.

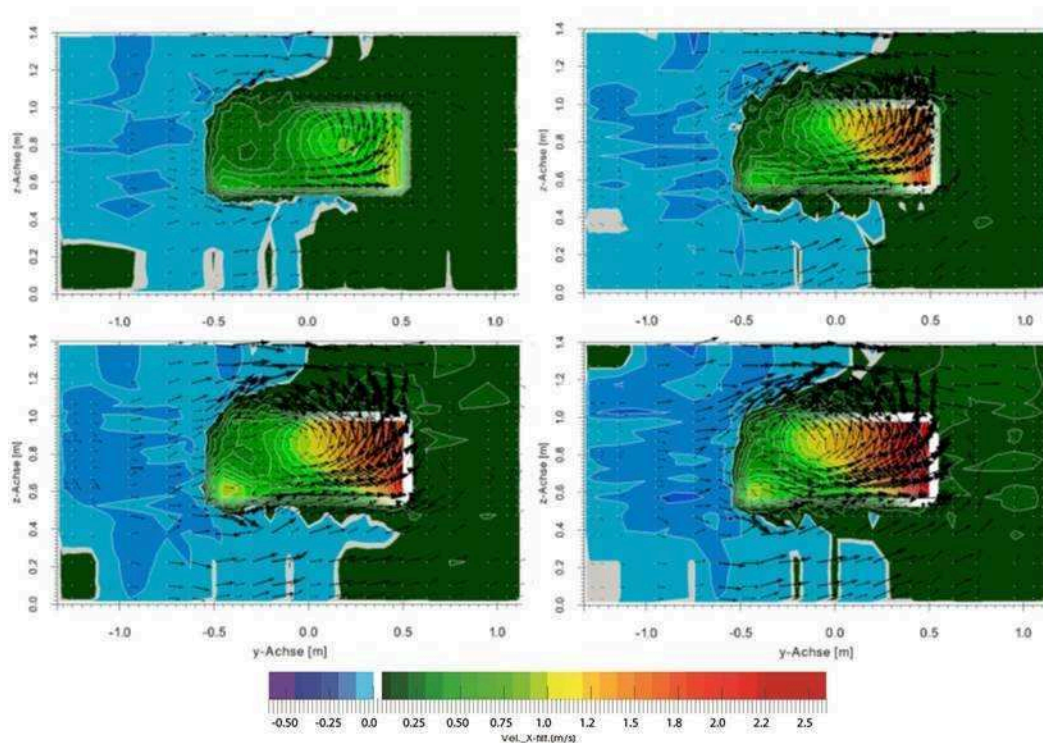
## 3 Ergebnisse

Die Untersuchungsreihe zur Einstiegsanordnung von FAA (AP 1) im Hinblick auf die Auffindbarkeit wurde durch Messungen im physikalischen Modell für eine weitere Geometrievariante ergänzt und damit abgeschlossen. Somit wurden für vier verschiedene Einstiegsgestaltungen (A, B1, B2 und C), die jeweils an Planungen für FAA am Neckar angelehnt sind, Messungen durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Geometrie der Einstiegsgestaltung deutliche Auswirkungen auf die Ausbildung der Leitströmung hat (vgl. Bild 1). Auch die benötigte Wassermenge ist abhängig von der gewählten Einstiegsgeometrie. Mit welcher Geometrievariante die beste Auffindbarkeit des Einstiegs erreicht werden kann, lässt sich aus diesen rein hydraulischen Untersuchungen jedoch nicht endgültig ableiten, sondern muss auf Basis biologischer Untersuchungen beurteilt werden.



**Bild 3:** Ausbildung der Leitströmung im Unterwasser der Stauanlage im Labormodell bei  $Q_{330}$  (entspricht  $166 \text{ m}^3/\text{s}$ ) für die untersuchten Geometrievarianten A, B1, B2 und C

Im Rahmen des AP 2 wurde die Datenbank mit charakteristischen Kenngrößen von Wasserkraftwerken und Stauanlagen an Bundeswasserstraßen ergänzt und fertig gestellt. Anhand der erhobenen Daten konnten typische Betriebspunkte identifiziert werden und am Turbinenversuchsstand der TU München untersucht werden. Die hierzu notwendigen Messungen im Labormodell wurden für fünf Betriebspunkte durchgeführt und analysiert. Bild 2 zeigt die Strömungsverhältnisse einer herkömmlichen Niederdruck- Kaplan-Turbine für vier der untersuchten Betriebspunkte am Austrittsquerschnitt des Saugschlauches im Unterwasser der Wasserkraftanlage. In folgenden Untersuchungen sollen weitere charakteristische Parameter- und Turbinenkonstellationen und deren Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse im Unterwasser untersucht werden.



**Bild 2:** Strömungsverhältnisse einer Niederdruck-Kaplan Turbine für vier verschiedene Betriebspunkte am Austrittsquerschnitt des Saugschlauches. Quelle: TU München

Im Rahmen des AP 2 wurde begleitend zum physikalischen Modell ein numerisches Modell aufgebaut, welches dazu genutzt wird, die Turbinenrandbedingung für die UW-Modelle zu testen und weiterzuentwickeln.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2016: Aufbau und Weiterentwicklung numerischer 3D Modelle aller Pilotstandorte (AP 1, 2 und 3)  
Naturmessungen an Pilotstandorten (AP 1, 2 und 3)  
Weiterführung der Untersuchungen am Turbinenversuchsstand an der TU München (AP 2)  
Weiterentwicklung numerisches 3D Modell durch Implementierung Turbinencharakteristika (AP 2)  
Entwicklung von Steuerungskonzepten zur Optimierung der Auffindbarkeit von FAA (AP 3)

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

#### 5 Literatur

- Dumont, U., P. Anderer & U. Schwevers (2005): Handbuch Querbauwerke. Düsseldorf (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und ländlichen Raum NRW), 212 S.  
DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2014): Merkblatt DWA-M 509 Fischaufstiegsanlagen und Fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. –Hennef, 334 S

#### 6 Veröffentlichungen

- Mayer, J. (2015): Wasserbauliche Modellversuche zur Beurteilung der Einstiegsgestaltung einer Fischaufstiegsanlage an der Staustufe Lauffen / Neckar. Bachelorarbeit an der Hochschule Konstanz Technik, Wirtschaft und Gestaltung (HTWG)

Kampke, W. (2015): Entrance arrangement of fishways – Interaction of entrance location, turbine flow and attraction flow. International Conference on Engineering and Ecohydrology for Fish Passage 2015. Groningen, Netherlands. 22.-24. Juni 2015

## **Untersuchungen zur Herstellung bzw. Verbesserung der Sedimentdurchgängigkeit an der Staustufe Iffezheim**

**Netzplan-Nr.:** A39530170005

**Projektleiterin:** Dr.-Ing. A. Wahrheit-Lensing, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Flussbau (W2)  
Dipl.-Phys. C. Seegers, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Flussbau (W2)

**E-Mail:** andrea.wahrheit-lensing@baw.de, christina.seegers@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Verminderung der Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb und im Nahbereich von Staustufen führt häufig zu regelmäßig wiederkehrenden Sedimentanlandungen, die negative Auswirkungen auf den Betrieb und die Sicherheit der Stauhaltung haben können. Aus diesem Grund werden diese Anlandungen regelmäßig durch Baggerungen entfernt. Die hydrodynamischen und sedimentologischen Prozesse, die die Anlandung in Stauhaltungen nach Ort und Menge beeinflussen, sind nicht hinreichend bekannt und untersucht. Daher besteht ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Transport, der Sedimentation und Erosion von Sedimenten in Stauhaltungen zu modellieren und hinsichtlich ihrer schädlichen Auswirkungen zu minimieren.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Das WSA Freiburg hat in einem Sachstandsbericht die Problematik der Sedimentation im Wehrkanal Iffezheim und die damit zusammenhängenden Maßnahmetätigkeiten seit der Inbetriebnahme der Staustufe Iffezheim zusammengestellt (WSV 2011). Aufgrund der seit 2005 ausgeschöpften Unterbringungsmöglichkeiten im Bereich der Staustufe und der nicht möglichen Verspülbarkeit des Baggergutes, werden neue Maßnahmen zur Verminderung der die regelmäßigen Baggerungen betreffenden Kosten gesucht, die langfristig zu einer wirtschaftlichen Gesamtlösung der Problematik im Wehrkanal Iffezheim führen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist es, Handlungsanweisungen für das Sedimentmanagement unter Berücksichtigung verschiedener hydrologischer und baulicher Situationen zu erarbeiten. Dazu wurde in der BAW bereits in den Jahren 2006 – 2008 ein TELEMAC-3D-Modell vom Nahbereich der Staustufe Iffezheim aufgebaut und betrieben. (BAW 2007, Brudy-Zippelius, 2007). Die Weiterentwicklung des 3D-Modells der Staustufe zielt auf eine möglichst realistische Nachbildung derjenigen Prozesse, die zu den Anlandungen im Wehrkanal von rd. 150.000 m<sup>3</sup>/a führen. Die Modellrechnungen sollen mit unterschiedlichen Auflösungen durchgeführt werden, um die relevanten Prozesse auf unterschiedlichen Skalen zu analysieren.

### **2 Untersuchungsmethoden**

#### **3D-hydrodynamisch-numerisches Modell der Staustufe Iffezheim**

- a) Mit einem sehr hoch aufgelösten **Modell A** wird eine Large-Eddy Simulation (LES) möglich. Mit diesem Modell A soll das Prozess- und Systemverständnis zu den Anlandungen im Wehrkanal durch ein breites Turbulenzspektrum verbessert werden. Der Simulationszeitraum wird sich dabei auf einige Stunden oder Tage erstrecken.
- b) Mit einem **Modell B** von geringerer Auflösung wird ebenfalls eine LES durchgeführt, die dann nur noch die größten turbulenten Strukturen abbildet. Das Modell B soll einen Simulationszeitraum von rd. 3 Monaten abdecken und eine Möglichkeit zur Kalibrierung und Validierung bieten.
- c) Mit einem **Modell C** von noch geringerer Auflösung soll ein Simulationszeitraum von mehreren Jahren betrachtet werden, um die langfristigen hydrologischen Einflüsse zu berücksichtigen.

Die unterschiedlichen Modelle A, B und C sind hinsichtlich ihrer Aussagekraft aufeinander abzustimmen.

Vertikale Impulsbilanzierung. Das Absetzverhalten der sehr feinen Sedimente in der Stauhaltung wird insbesondere durch die vertikale Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst. Aus diesem Grund soll im Gegensatz zu den früheren Untersuchungen auf die vereinfachende Vernachlässigung der vertikalen Impulsbilanz (hydrostatische Druckannahme) verzichtet werden.

Turbulenzmodellierung. Statt der klassischen Turbulenzmodelle ( $k-\varepsilon$ -/  $k-\omega$ -Modell) soll in den Modellen A und B die Large-Eddy Simulation (LES) zur Turbulenzmodellierung eingesetzt werden. Es sollen im Modell A, die für die Sedimentation maßgeblichen Wirbel im Strömungsmodell abgebildet werden.

Sedimenttransportmodellierung. Mit den Weiterentwicklungen am hydrodynamischen Modell soll eine möglichst realitätsnahe Nachbildung der Strömungsprozesse im Bereich der Staustufe erzielt werden.

### 3 Ergebnisse

In Kooperation mit der RWTH Aachen wurde im November 2012 damit begonnen das bestehende 3D-TELEMAC-Modell aus dem Jahre 2006 zu reaktivieren. Es wurden sowohl neue Geländedaten als auch die fünfte Turbine eingefügt. Die in 2013 begonnen Untersuchungen wurden weitergeführt und vertieft.

Es erfolgte eine sukzessive Verbesserung der Kalibrierung des Modells C. Es zeigte sich, dass die hydrodynamische Simulation die Geschwindigkeiten in der Staustufe zufriedenstellend abbildet. Im Bereich der sedimentbeeinflussenden Prozesse und Randbedingungen bzw. Eingabedaten aus den Naturmessungen bestehen jedoch Defizite.

Im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen wurden u.a. die Zuflussbedingungen des Sediments, die Korngrößen und die Diffusion des Sediments variiert und die naturnahen Abbildungen der Wirbelstrukturen (siehe Bild 1 links) im Wehrkanal untersucht.

2015 wurden Netze mit höheren Auflösungen zur genaueren Betrachtung der Wirbelstrukturen im Wehrkanal aufgebaut und auf ihre Stabilität hin getestet. Dabei stellte sich der Auslaufrand am Wehr als Schwachstelle für sehr hohe Auflösungen heraus. Die geplanten Detailuntersuchungen des hochaufgelösten Modells sind damit nur teilweise möglich. Ein LES im engeren Sinne (vgl. Pope 2004) konnte auch mit hohen Auflösungen im Wehrkanal nicht überall erreicht werden (siehe Bild 1 rechts).

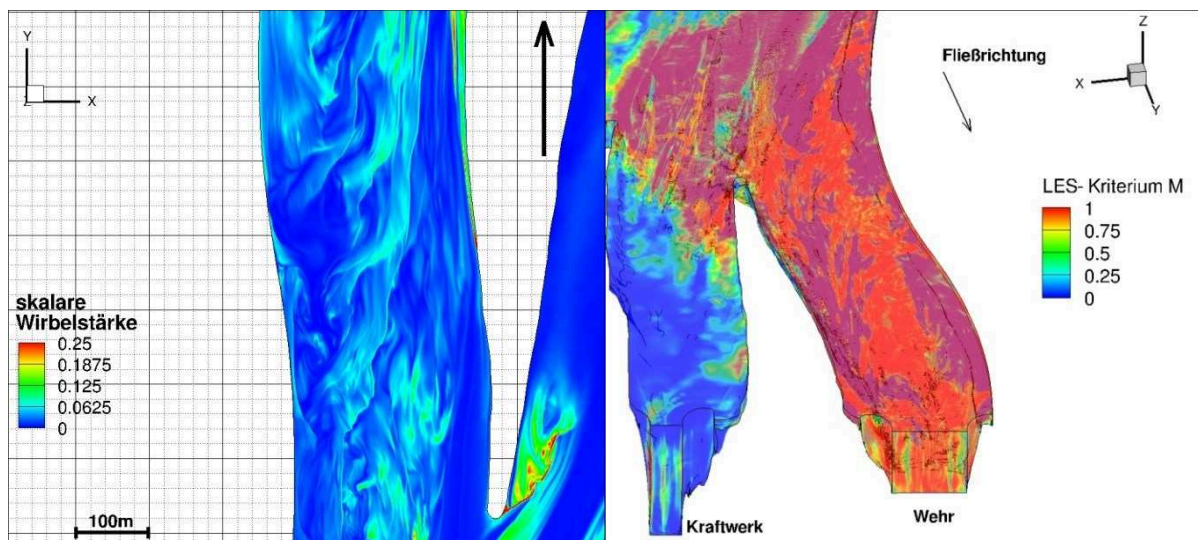


Bild 1: Wirbelstärke (links) und Darstellung eines LES-Kriteriums (rechts) nach Pope (2004), wobei nur Werte über 0,8 das Kriterium erfüllen, bei einem Abfluss von  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Die Betrachtung eines stationären Zustandes mit Abfluss  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  (Bild 2) ermöglichte eine Einschätzung der Zeitskala auf der sich die Wirbelbewegungen im Wehrkanal abspielen. Diese liegt in



der Größenordnung einer halben Stunde. Für eine statistische Betrachtung der Wirbelstrukturen sind daher (für stationäre Zustände) Simulationsdauern von mehreren Stunden notwendig. Neben dieser zeitlichen Betrachtung wurde auch eine räumliche Betrachtung dieses Wirbels durchgeführt und zeigt Wirbel mit Ausdehnungen im Bereich von 20m (Breite) bis 200m (Länge).

In den nun ausstehenden weiteren Schritten sollen die bisher rein hydrodynamischen Berechnungen um das Sedimentmodul ergänzt werden, um die Sedimentbetrachtungen des Projektes ins Zentrum zu rücken. Dazu sind zunächst wieder Kalibrierungen und Validierungen nötig.

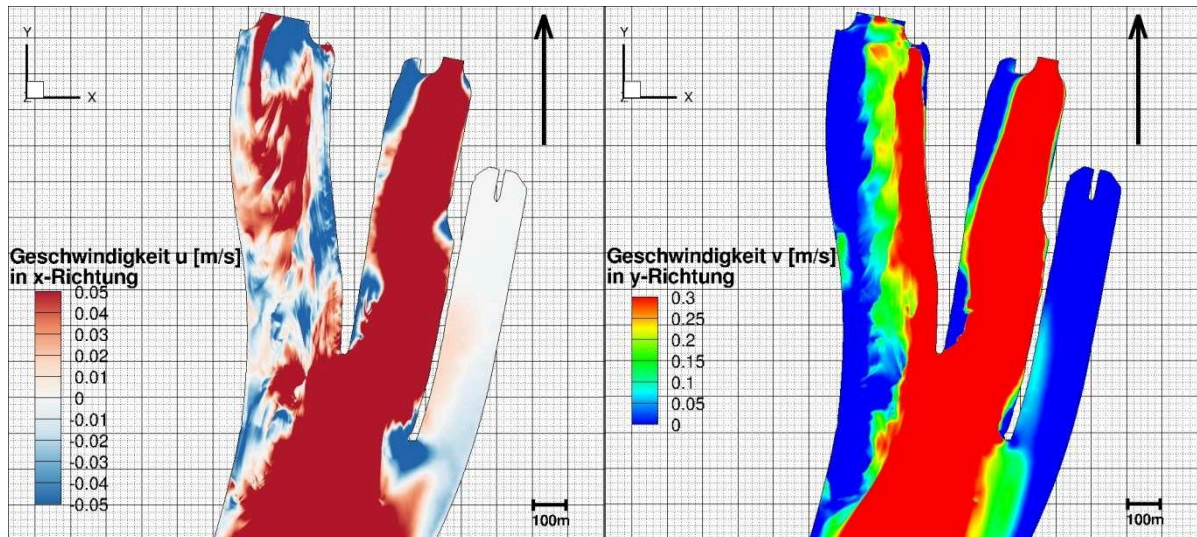


Bild 2: Geschwindigkeiten in x und y-Richtung für einen Zeitpunkt der Simulation mit hoher Auflösung und Abfluss von 1500 m<sup>3</sup>/s.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Zur Verbesserung des Modells wird eine neue Kalibrierung, auch eines Netzes mit höherer Auflösung angestrebt. An Sensitivitätsbetrachtungen für die Parameter Sinkgeschwindigkeit und Sedimenteinkauf sollen sich Variantenuntersuchungen aus dem Bereich der betrieblichen Maßnahmen anschließen. Diese Varianten bestehen in unterschiedlichen Sohltopographien und Abflüssen (Strömungs- bzw. Wirbelstrukturen im Wehrkanal), sowie Abflussverteilungen.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

#### 5 Literatur

- BAW (2007): Gutachten zu Wasserspiegellagen und Freibord in der Stauhaltung Iffezheim unter Berücksichtigung verschiedener Sohlzustände im oberen Wehrkanal. Gutachten-Auftrags-Nr. A39530110058, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- Brudy-Zippelius, T., Zentgraf, R. (2007): Gutachten zu Wasserspiegellagen und Freibord in der Stauhaltung Iffezheim unter Berücksichtigung verschiedener Sohlzustände im oberen Wehrkanal 01.06.2007 (A39530110058).
- Pope, S.B. (2004): Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows. New journal of Physics 6(1) doi: 10.1088/1367-2630/6/1/035
- WSV (2011): Sachstandsbericht oberer Wehrkanal 2011.

#### 6 Veröffentlichungen

- Seegers, C. (2014): Zwischenbericht: Untersuchungen zur Herstellung bzw. Verbesserung der Sedi-mentdurchgängigkeit an der Staustufe Iffezheim, (unveröffentlicht)

## **Hydraulische Wirkung von Stromregelungsbauwerken**

**Netzplan-Nr.:** A39530210077

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. B. Hentschel, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Flussbau (W2)

**E-Mail:** bernd.hentschel@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung werden an den deutschen Wasserstraßen zur Gewährleistung und Verbesserung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt Buhnen und Parallelwerke gebaut und unterhalten. Die Kenntnisse über die genauen Strömungsverhältnisse im Nahbereich dieser Flussregelungsbauwerke mit ihren Auswirkungen auf die Morphologie der Flusssohle und der Buhnenfelder ist unzureichend. Die BAW berät die WSV bei der Planung von Maßnahmen an Regelungsbauwerken und muss deshalb über entsprechendes Wissen verfügen und dieses aufgrund höherer und veränderter Anforderungen ständig erweitern. Die Untersuchungen dienen der Vertiefung der Erkenntnisse zu den komplexen Strömungs- und Feststofftransportvorgängen im Nahbereich von Stromregelungsbauwerken und sollen generell die Prognosefähigkeit verschiedener Modellierungsmethoden verbessern.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine detaillierte Kenntnis des Geschiebetransportes und der Bewegungsmuster von Sohlformen und deren Interaktion mit der Hydraulik ist für unterschiedliche Fragestellungen der WSV von hoher Bedeutung. Dazu gehören zum Beispiel die Anpassung von Sollkonzepten für die Unterhaltung der Stromregelungsbauwerke an geänderte Rahmenbedingungen (Schiffsgefäße, Verkehrsrelationen etc.) und geänderte Anforderungen aus Klimaänderungen und Gesetzen (Geschiebedurchgängigkeit, Wasserrahmenrichtlinie, wasserwirtschaftliche Unterhaltung etc.).

Im Rahmen der wasserwirtschaftlichen Unterhaltung an Bundeswasserstraßen ist angedacht, gezielt Stromregelungsbauwerke zu modifizieren. Größere Veränderungen werden dabei voraussichtlich auch Auswirkungen auf den Geschiebetransport im Nahbereich der Bauwerke und in der Fahrrinne haben. Ziel der Untersuchungen ist es, diese Auswirkungen allgemeingültig sowohl hydraulisch als auch morphologisch quantifizieren zu können und für Prognosen zugänglich zu machen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist es, systematisch die Auswirkungen von Stromregelungs- und Unterhaltungsvarianten auf den Geschiebetransport und die Sohlformen in alluvialen, frei fließenden Gewässern zu analysieren, um sie mittels numerischer und physikalischer Modellierungen prognostizierbar zu machen. Daneben sollen durch vergleichende Analysen von Naturuntersuchungen die Maßstabgesetze für die Modellierung von Sedimentbewegungen in physikalischen Modellen weiterentwickelt werden. Derzeit gibt es zum Beispiel keine publizierten Ansätze um Sohlformen bei unterschiedlichen Kornverteilungen in physikalischen Modellen über das ganze Abflussspektrum naturähnlich abbilden zu können.

### **2 Untersuchungsmethoden**

In den Jahren 2014 und 2015 wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasser- und Kreislaufwirtschaft der Hochschule Magdeburg / Stendal das Spektrum möglicher Modellierungsphänomene in hydraulischen Modellen durch gezielte Untersuchungen zu unterschiedlichen Ersatzmaterialien als Modellsedimente ausgeweitet, um zum Beispiel die Morphologie im Flussschlauch und im Buhnenfeld in einem einzigen Modell bei unterschiedlichen Abflüssen untersuchen zu können.

Die Auswertungen und Analysen der Naturuntersuchungen an der Elbe an alternativen Buhnenformen (Knickbuhnen und Buhnenkerben sowie Referenzbuhnenfelder bei Schönberg) wurden fortgesetzt. Das begleitende Langzeitmonitoring wird ergänzt durch Messungen zur Veränderlichkeit von Buhnenfeldgeometrien in anderen Abschnitten der Elbe, um die Ergebnisse verallgemeinern zu können.

(Hentschel 2014). Die Ergebnisse dieses Projektes werden in einer interdisziplinären Publikation gemeinsam mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde und externen Autoren zusammengefasst. Diese zusammenfassende Schrift ist nahezu fertig gestellt und liegt derzeit bei externen Korrekturlesern. Die Übergabe an einen Verlag ist für das Jahr 2016 geplant.

An einer flussbaulichen Laborrinne (30 x 5 m) können systematische Untersuchungen zum Geschiebetransport durchgeführt werden. Die Rinne verfügt dafür über ein hochentwickeltes und weitgehend automatisiertes Messequipment für Wasserspiegel- und Sohlvermessungen. Der Geschiebeein- und -austrag kann zeitabhängig automatisch quantifiziert werden. An einer weiteren Laborrinne (60 x 2,5 m) wurden Untersuchungen zur Modifikation von Stromregelungsbauwerken fortgesetzt. Diese rein hydraulischen Untersuchungen umfassen das Abflussspektrum von umströmten bis stark überströmten Bauwerken. Die Rinne konnte im Jahr 2015 für eine automatisiert arbeitende Messtraverse vorbereitet werden.

### 3 Ergebnisse

Die nun vorliegenden Ergebnisse der Studie zur Modellierung stark abgestufter Sedimentmischungen, die im Auftrag der BAW an der Hochschule Magdeburg durchgeführt wurde, wird derzeit in der BAW für ein gegenständliches Modell des Mittelrheins verwendet, um dort die Auswirkungen von variierten Stromregelungsbauwerken auf den Sedimenttransport untersuchen zu können.

Im Jahr 2015 wurden in der flussbaulichen Systemrinne Untersuchungen zur Wirkung von unterschiedlichen Bühnen-Geometrien (Bühnenkerben, Variation des Bühnenabstandes etc.) auf die Hydraulik und den Geschiebetransport fortgeführt. An dieser Rinne und an der vorhandene 2,5 m Rinne wurden die Auswirkungen von Kolken und Kolkverfüllungen an Bühnenköpfen auf die Wasserstände und die Hydraulik im Nahbereich untersucht. Die Ergebnisse fließen in laufende Untersuchungen zur Anpassung der Donau ein.



*Bild 1: Untersuchungen zur hydraulischen Wirkung von Kolken. Links 2,5 m Rinne, Rechts 5,0 m Rinne*

Bild 1 zeigt links Untersuchungen den Einbau von schematisierten Kolken in der 2,5 m Rinne bei einer Kieossohle zur Ermittlung der großräumigen Auswirkung von mehreren Kolkverfüllungen insbesondere auf die Wasserspiegellagen. Rechts ist ein schematisierter und fixierter Kolk in der 5-m Rinne zu sehen. Dieser kann einfach und reproduzierbar in unterschiedlichen Horizonten verfüllt werden.



An den Laborrinnen wurden auch im Jahr 2015 hochwertige Modelldaten für die Weiterentwicklung und Verifikation von numerischen Modellverfahren gewonnen. Diese Daten werden zusammenfassend analysiert und dokumentiert, um sie langfristig sowohl in der BAW als auch außerhalb für diesen Zweck nutzbar machen zu können.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Erstellung des Abschlussberichts in 2016.

Laufzeit des Vorhabens: 1999 bis 2016.

#### **5 Literatur**

-/-

#### **6 Veröffentlichungen**

- Ettmer, B. (2012): Nachbildung von Sieblinien aus künstlichen Sohlenmaterialien in experimentellen Untersuchungen. Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft. Magdeburg 2012. Bericht im Auftrag der BAW
- Hentschel, B. (2014): Ökologisch optimierte Buhnen. 4. Burgdorfer Wasserbautag 2014, „Bauen im Wasser“. Fachveranstaltung am 19.11.2014 in Burgdorf, Schweiz. Abdruck im Tagungsband
- Mietz, S.; Hentschel, B.: Analyse und Vergleich morphologischer Buhnenmodellversuche; 17. JuWi-Treffen 26.-28.08.2015 an der TU Dresden, Veröffentlichung im Tagungsband

## **Effizienz- und Genauigkeitssteigerung der Modellierung der Hydrodynamik der Flüsse mit einem kombinierten Multigrid- und Subgrid-Ansatz**

**Netzplan-Nr.:** A39530270002

**Projektleiter/in:** Dr. R. Patzwahl, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Flussbau (W2), Prof. G. S. Stelling, TU Delft

**E-Mail:** regina.patzwahl@baw.de, g.s.stelling@tudelft.nl

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Bei der numerischen Modellierung von Flüssen ergibt sich oft ein Zielkonflikt zwischen der Genauigkeit und Korrektheit der Berechnung von Strömungszuständen und der zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten. Eine Effizienzsteigerung der Verfahren kann nicht nur durch Anwendung leistungsfähiger Hardware und entsprechender Programmieretechniken erreicht werden, sondern auch durch methodische Entwicklungen. Die sich in der Entwicklung befindende Subgrid-Methode erlaubt eine Erhöhung der Genauigkeit der Repräsentation der Bodentopographie des zu modellierenden Gebiets, ohne die Rechenaufwände zu erhöhen, und gleichzeitig eine wesentliche Verbesserung der Reproduktion von Überflutungs- und Trockenfallen-Prozessen (Casulli, Stelling 2010). Die bereits etablierte Multigrid-Methode, die eine Hierarchie der Haupt- und Subnetze nutzt, bringt eine Verbesserung der Effizienz des Lösungsverfahrens mit sich, insbesondere für (quasi-)stationäre Strömungszustände.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

- Wesentliche Effizienzsteigerung der Berechnung von quasi-stationären und auch stationären Strömungen in Flüssen bei gleichzeitiger Erhöhung der Genauigkeit (auch in Hinblick auf morphodynamische Berechnungen).
- Effiziente Nutzung der in immer höherer Genauigkeit vorliegenden Geländemodelle, mit dem Ziel, ein Gleichgewicht zwischen rechnerischem Aufwand und der Korrektheit der Modellierung zu finden.
- Vertiefung der fachlichen Beziehungen zwischen Deutschland und den Niederlanden und ihren wasserbaulichen Einrichtungen Rijkswaterstaat und Deltares sowie der TU Delft.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

- Analyse des Ist-Zustandes der numerischen Modellierung von Flüssen im Hinblick auf mögliche Verbesserungen der Modellierungsmethoden und deren Effizienzsteigerung.
- Entwicklung der Methoden für eine zur Topographie konsistente hoch aufgelöste Abbildung des Geschwindigkeitsfeldes auf Subgrid-Niveau.
- Untersuchung der Effizienz eines kombinierten Multigrid-/ Subgrid-Ansatzes zur Beschleunigung der Berechnung von stationären Strömungszuständen in Flüssen.
- Untersuchung der Genauigkeit der Subgrid-Methode bezüglich der Wiedergabe von Sohl-schubspannungsverteilungen auf Subgrid-Niveau im Hinblick auf die Anwendbarkeit der Entwicklung in der Modellierung morphologischer Prozesse.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Numerische Methoden für Strömungen mit freier Oberfläche und Morphodynamik der Flüsse, mit Betonung auf Multi- und Subgrid-Methoden.

### **3 Ergebnisse**

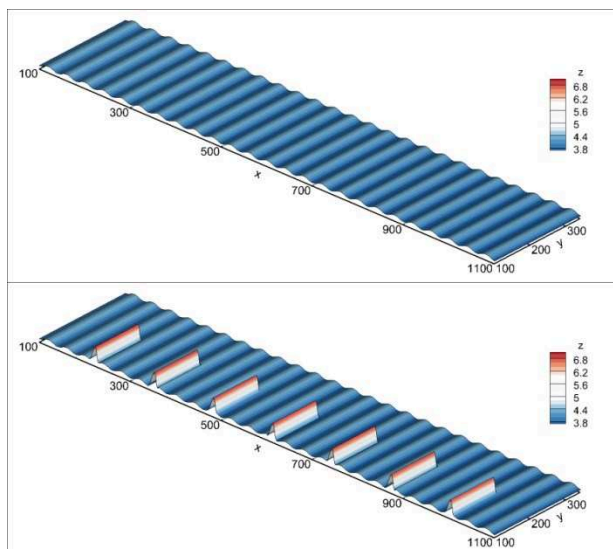
Im Jahr 2015 lag der Fokus auf dem Einfluss von Regelungsbauwerken und der Sohltopographie auf die Strömung. Dabei wurde vor allem die Stauwirkung und deren Berechnung mithilfe numerischer Verfahren analysiert. Um sicher zu sein, dass diese Phänomene im numerischen Modell richtig abgebildet werden, müssen die Einflüsse von mathematischen und numerischen Ansätzen, von Implemen-

tierungen sowie von Modelleffekten separiert und quantifiziert werden. Die folgenden vier Bausteine wurden als wichtigste Einflussfaktoren bei numerischen hydraulischen Berechnungen in diesem komplexen Zusammenspiel identifiziert und werden innerhalb der Kooperation detailliert untersucht: Rengitter, Advektion, Diffusion und Turbulenz.

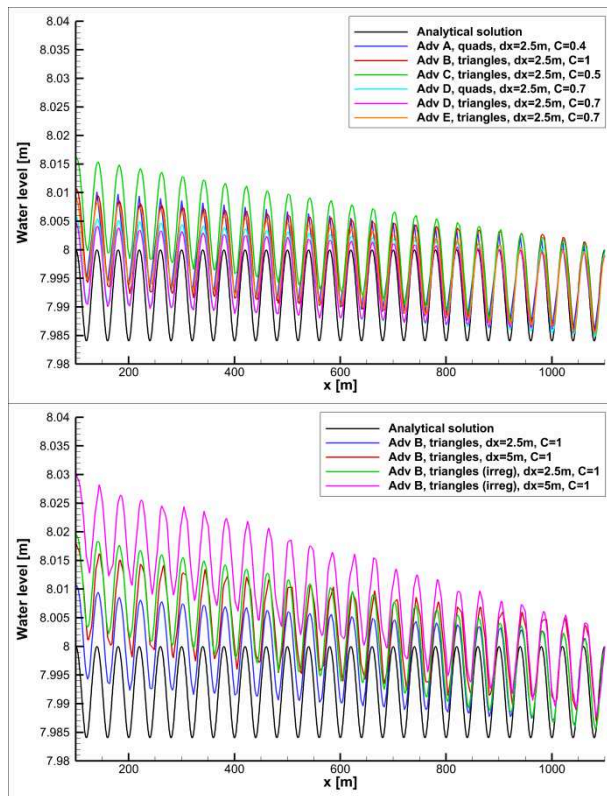
Eine wichtige Frage, auf die bisher noch keine zufriedenstellende Antwort gegeben werden kann, ist, welchen Einfluss der Advektionsansatz im Zusammenspiel mit dem Rengitter auf die Modellergebnisse hat. Dies gilt insbesondere in der Nähe von Regelungsbauwerken und in Bereichen mit starker Variabilität der Gewässertopographie. Ziel war es daher, die numerische (nicht die physikalische) Dissipation/Diffusion und ihre Abhängigkeit von der Strömungsrichtung in Bezug zur Gitterausrichtung zu quantifizieren. Zu diesem Zweck wurde eine Reihe von Validierungsbeispielen mit verschiedenen Verfahren, Modelleinstellungen und Rengittern aufgestellt und systematisch bearbeitet. Das wesentliche Ziel war, die numerische Rückstauwirkung und damit die numerische Dissipation für jeden Testfall, jede Gitterstruktur und für jedes (Advektions-)Verfahren zu bestimmen. Die Tests waren aufgrund der höheren Relevanz für die Praxis im Wesentlichen auf 2D-Simulationen beschränkt.

Als Ergebnis der Untersuchungen soll eine verbesserte Kenntnis darüber vorliegen, welche Advektionsansätze in Kombination mit welchen Gittern am besten für die numerische Modellierung von Fließgewässern, insbesondere Binnenwasserstraßen mit Regelungsbauwerken, geeignet sind. Zusätzlich kann für die verschiedenen getesteten Ansätze und Gitter die numerische Dissipation quantifiziert werden.

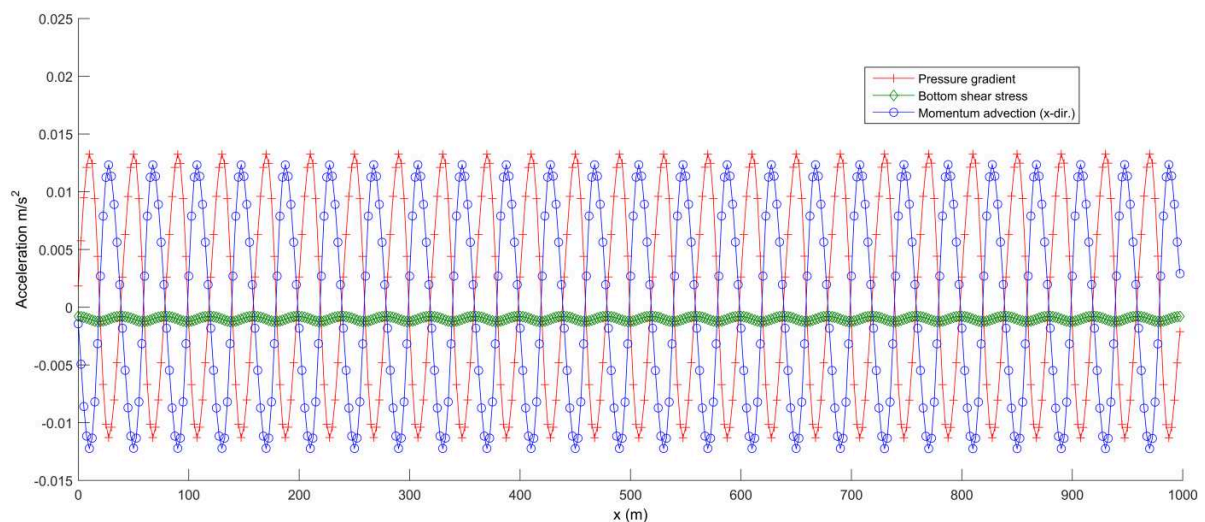
Die gewählten Testfälle untergliedern sich in: (1) uniforme Kanalströmung, (2) reibungsfreie Strömung über eine Sinus-Sohle, (3) reibungsbehaftete Strömung über eine geneigte Sinus-Sohle (Amplitude 0,3 m bei einer Wassertiefe von ~4 m) sowie (4) reibungsbehaftete Strömung um und über schematische Buhnen auf geneigter Sinus-Sohle (Bild 1). Alle Testfälle wurden mit 19 verschiedenen Advektionsverfahren (erster und höherer Ordnung) untersucht. Abhängig von den verwendeten Verfahren wurden vier verschiedene Netzstrukturen (zwei Vierecks- und zwei Dreiecksgitter) aufgebaut. Jede Variante wurde in mindestens drei Auflösungen berechnet. Hauptsächlich wurden 2D-Simulationen durchgeführt, da sie den Hauptanteil von Simulationen in der täglichen Praxis bilden. Damit steht ein Datensatz zur Auswertung zur Verfügung, der aus ca. 600 Einzeltests besteht.



**Bild 1:** Darstellung der Geometrie der Testfälle (3) reibungsbehaftete Strömung über eine geneigte Sinus-Sohle sowie (4) reibungsbehaftete Strömung um und über schematische Buhnen auf geneigter Sinus-Sohle.



**Bild 2:** Berechnete Wasserspiegel im Vergleich mit der analytischen Lösung für den Testfall (2). Links: Beste Ergebnisse von fünf verschiedenen Advektionsverfahren, rechts: Einfluss der Gitterstruktur auf das Ergebnis mit Advektionsschema Adv B



**Bild 3:** Lokale Beiträge in der Impulsgleichung von Druckgradient, Sohlreibung und Advektion für die Strömung über eine geneigte Sinus-Sohle (Testfall (3)) für das Stelling-ADI-Advektionsschema.

Die Auswertung umfasst neben der Quantifizierung der numerischen Stauwirkung (Bild 2) die globale und lokale Bilanz der Terme, die Advektion, Druck durch Wasserspiegelgradienten und Sohlreibung. Auf diese Weise kann der Einfluss des Advektionsschemas und des Gitters in Form einer numerischen Stauwirkung untersucht werden und mit dem Einfluss anderer Terme, z.B. Sohlreibung und Formverluste verglichen werden. Die lokale Bilanzuntersuchung hat gezeigt, dass die übliche Annahme, dass Flüsse hauptsächlich von einer Bilanz zwischen Sohlreibung und Druckgradient bestimmt sind, lokal nicht zutrifft. Schon bei kleinen Amplituden von Sohlformen im Vergleich zur Wassertiefe, spielen advective Terme (Beschleunigungen) eine große Rolle und dominieren die lokale Bilanz zusammen mit den Druckgradienten. Die Sohlreibung trägt zu dieser Bilanz deutlich weniger bei (Bild 3).

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016: Ausarbeitung der Veröffentlichung zu dem Themenkomplex „Accuracy and grid dependency of momentum advection schemes for river flows“, Verfassen des Abschlussberichts und Abschlussveranstaltung.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2016.

#### **5 Literatur**

Casulli V., Stelling G.S. (2010) Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. Erschienen online, International Journal for Numerical Methods in Fluids, doi: 10.1002/fld.2361.

#### **6 Veröffentlichungen**

Patzwahl, R., Baron, M. (2013): Influence of Numerical Schemes in Representing Flow Over and Around Groynes. Proceedings XXth Telemac Users Conference, Karlsruhe.

Platzek, F.W., Stelling, G.S., Jankowski, J.A., Patzwahl, R. (2012): On the representation of bottom shear stress in z-layer models. Proceedings of HIC 2012 - 10th International Conference on Hydroinformatics, Hamburg, Germany, July 14-18, 2012.

Platzek, F.W., Stelling, G.S., Jankowski, J.A., Pietrzak, J.D. (2014): Accurate vertical profiles of turbulent flow in z-layer models. Water Resour. Res., 50, doi:[10.1002/2013WR014411](https://doi.org/10.1002/2013WR014411).

Platzek, F.W., Stelling, G.S., Jankowski, J.A., Patzwahl, R., Pietrzak, J.D. An efficient semi-implicit subgrid method for free-surface flows on hierarchical grids. Int. J. Numer. Meth. Fluids, DOI: 10.1002/fld.4172.

## **Entwicklung eines vereinfachten Füllsystems für Sparschleusen**

**Netzplan-Nr.:** A39530370002

**Projektleiter:** Dr.-Ing. C. Thorenz, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserbauwerke (W3)

**E-Mail:** carsten.thorenz@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Für Sparschleusen mit großer Hubhöhe hat sich in Deutschland ein Füllsystem mit einer Druckkammer unter der eigentlichen Schleusenkammer als einfache Gestaltungsvariante bewährt. Hierbei dient die Druckkammer zur gleichmäßigen Verteilung des einströmenden Füllwassers von Oberstrom und den Sparbecken. Die Einläufe werden dabei aufwändig gestaltet und möglichst tief angeordnet, um das Einziehen von Luft in das Füllsystem zu verhindern. Im Zuge der Bearbeitung der hydraulischen Gestaltung des Füll- und Entleersystems der neuen Schleusen Erlangen und Kriegenbrunn wurde die Idee verfolgt, auf Umläufe (und die zugehörigen Schütze) sowie einen tiefliegenden Einlaufbereich zum Anschluss an das Oberwasser vollständig zu verzichten. Hierzu wurde ein Konzept entwickelt, bei dem das Druckkammerfüllsystem direkt über ein Drucksegmentobertor beaufschlagt wird. Erste numerische Untersuchungen zeigten, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit bei Normalbetrieb den Anforderungen entspricht (Thorenz und Strybny, 2012). Im gestörten Betrieb ohne Sparbecken ist jedoch mit einem verstärkten Eintrag von Luft in das Füllsystem zu rechnen, welche die globalen Strömungseigenschaften des Systems maßgeblich beeinflussen könnten. Möglichst genaue Informationen über das Verhalten der Luft-Wasser-Strömung im untersuchten System sind daher von großer Bedeutung. Im Bereich der gegenständlichen Maßstabsmodelle ergeben sich durch die Skalierung unvermeidbare Maßstabseffekte, die bei Luft-Wasser-Gemischen dazu führen, dass der tatsächliche Lufteintrag und die daraus entstehenden Effekte nicht maßstabsgetreu abgebildet werden. Dies resultiert vor allem daraus, dass an der Phasengrenzfläche die Oberflächenspannung des Wassers eine entscheidende Rolle spielt, welche selbst bei der Verwendung eines Ersatzfluids mit entsprechender Oberflächenspannung das Verhalten der Luftblasen im Wasser nur fehlerhaft abbilden kann (Chanson, 1999). Bei der Untersuchung von Strömungen mit Hilfe von numerischen Werkzeugen können nur dann brauchbare Ergebnisse erzielt werden, wenn alle physikalisch relevanten Prozesse im Modellansatz hinreichend genau abgebildet werden. Die im Wasserbau üblichen computergestützten Modelle, die auf den Navier-Stokes-Gleichungen mit einem Volume-of-Fluid-Ansatz basieren, sind nur bei sehr hoher Gitterauflösung geeignet, den erwarteten Lufteintrag abzubilden. Es muss daher ein alternativer Ansatz gefunden werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Das vereinfachte Füllsystem hätte erhebliche Vorteile: Kein großer und tiefer Einlauf wie bei anderen Sparschleusen mit großer Hubhöhe, durch den Verzicht auf Umläufe eine reduzierte Anzahl von schlecht erreichbaren Betriebsverschlüssen, eine reduzierte Größe der Baugrube und des Gesamtbauwerks. Es ist davon auszugehen, dass dieses Konzept bei Realisierbarkeit zu einer erheblichen Reduzierung der Baukosten und der Betriebskosten großer Sparschleusen führt.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, ein vorentworfenen, neuartiges Füllsystem für Sparschleusen auf seine Praxistauglichkeit zu untersuchen und ggf. zu verbessern. Dazu ist es erforderlich, auch die numerischen Werkzeuge für die Berechnung von Luft-Wasser-Gemischen sowie die Bewegung von Schiffen in der Kammer weiterzuentwickeln. Diese Weiterentwicklungen stellen ein wichtiges Nebenziel dar, da sie für vielfältige weitere Aufgaben anwendbar sind.

### **2 Untersuchungsmethoden**

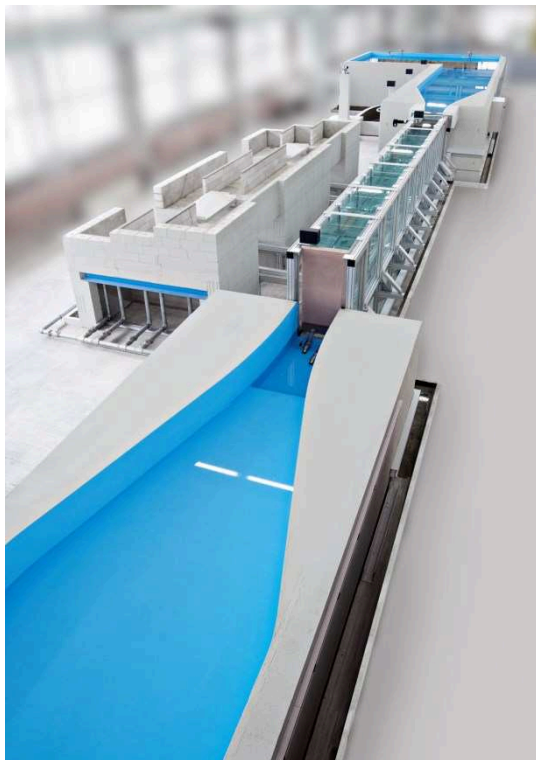
Im Rahmen des Vorhabens soll ein anwendungsorientierter numerischer Ansatz für die Beschreibung von Zweiphasenströmungen entwickelt werden, mit dem die Modellierung von unterschiedlichen



Strömungsregimes für Luft-Wasser-Gemische innerhalb eines Rechenggebietes ermöglicht wird. Mit Hilfe dieses Ansatzes soll es möglich werden, ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen im Bereich von Luft-Wasser-Strömungen besser untersuchen zu können. Der entwickelte Ansatz soll möglichst in eine frei verfügbare CFD-Software (z.B. OpenFOAM, Weller et al., 1998) implementiert werden. Parallel sollen die verfügbaren numerischen Methoden im Hinblick auf Luft-Wasser-Gemische sowie die Bewegung des Schiffs in der Kammer weiterentwickelt werden. Zum Vergleich wird ein Labormodell des vorgestellten Schleusenkonzepts erstellt. Da die Naturähnlichkeit der Luftblasenbewegung im Labormodell nicht gegeben ist, soll das Labormodell verwendet werden, um die Entwicklungen im numerischen Modell im Labormaßstab zu validieren, um dann mit dem numerischen Modell die Skalierung auf den Naturmaßstab durchzuführen.

### 3 Ergebnisse

Im Rahmen des FuE Vorhabens wurde ein Algebraisches Mischungsmodell (engl: algebraic mixture model) nach Damian (2013) in die Open Source Software OpenFOAM implementiert und anhand von Validierungsbeispielen untersucht. Anfängliche Stabilitätsprobleme wurden behoben und verschiedene Diskretisierungsschemata wurden auf ihre Anwendbarkeit getestet. Der Ansatz wurde dahingehend erweitert, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen nicht mehr nur auf kalibrierten Variablen, sondern auf einer Berechnung der Blasenauftiegschwindigkeit nach Manninen et al. (1996) basiert. Das implementierte Mischungsmodell erlaubt damit die physikalische Entmischung der Phasen Luft und Wasser in dispersen Bereichen auf Grundlage der Blasenauftiegschwindigkeit. In Bereichen, in denen z.B. die kontinuierliche Phase „Wasser“ von kleinen Luftblasen durchdrungen wird, die auf dem groben Rechengitter nicht erfasst werden können, entsteht ein Impuls der die Entmischung antreibt. Die ermittelte Blasenauftiebsgeschwindigkeit ist dabei abhängig von dem Blasendurchmesser, der Anzahl der Blasen, dem Formwiderstandskoeffizienten, der Partikelrelaxationszeit und der Beschleunigung der Blasen. In ersten Validierungsbeispielen konnte gezeigt werden, dass die numerische Entmischungsgeschwindigkeit gut mit analytischen Ansätzen übereinstimmt.



**Bild 1:** Fotos des gegenständlichen Modells. Links: Übersicht über das gesamte Modell mit Blick vom Unterwasser auf die Schleuse. Rechts: Seitliche Ansicht des Füllschachtes mit geöffnetem Drucksegment.

Im nächsten Schritt soll das implementierte Modell für eine Simulation der Schleusenfüllung angewandt werden. Die Ergebnisse können dann mit den Messungen aus dem gegenständlichen Modell (siehe Bild 1) verglichen werden. An diesem können zwar noch nicht die auftretenden Schiffskräfte, aber der Luftgehalt des eingetragenen Wassers ermittelt und mit den numerisch erzielten Ergebnissen verglichen werden.

Daraus wird sich zeigen, ob Anpassungen am entwickelten Modell notwendig sind, um die implementierte Anwendung für große, komplexe Anwendungsfälle wie die Schleusenfüllung auf Effizienz und Stabilität zu optimieren. Im Weiteren ist zu prüfen, ob eine Erweiterung mit einem Modell notwendig ist, welches den Lufteintrag des fallenden Strahles im Fallschacht der Schleuse modelliert (z.B. in Analogie zum Ansatz von Ma et al., 2010), oder ob der Lufteintrag durch eine hohe lokale Gitterauflösung ausreichend genau abgebildet werden kann.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016: Numerik: Weitere Untersuchungen des Algebraischen Mischungsmodell-Ansatzes an geeigneten Beispielen. Vergleich der Ergebnisse zwischen numerischen Modell und Labormodell. Ausführliche Dokumentation der Methodik und Ergebnisse.  
Labormodell: Messreihen für verschiedene Schützöffnungsweiten, Entwurf von alternativen Gestaltungsvarianten des Füllschachtes. Für die zur Untersuchung der Skalierungseffekte ist eventuell ein Ausschnittsmodell des Füllschachtes notwendig.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2017 (beantragt).

#### 5 Literatur

- Chanson, H. (1999): Air-water bubbly flows – Theory and applications. Dissertationsschrift, School of Engineering, The University of Queensland, Australien.
- Damian, S. M. (2013): An Extended Mixture Model for the Simultaneous Treatment of Short and Long Scale Interfaces. Dissertationsschrift, Universidad Nacional del Litoral, Argentinien.
- Ma, J., Oberai, A. A., Drew, D. A., Lahey, R. T., & Moraga, F. J. (2010): A quantitative sub-grid air entrainment model for bubbly flows – plunging jets. *Computers & Fluids*, 39(1), 77–86.
- Manninen, M., Taivassalo V. & Kallio S. (1996): On the mixture model for multiphase flow. Technical Research Centre of Finland, Finland.
- Weller, H.G., Tabor G., Jasak, H., Furby, C. (1998): A Tensorial Approach to CFD using Object Oriented Techniques. *Computers in Physics*, Vol. 12 No. 6, pp 620–631.

#### 6 Veröffentlichungen

- Thorenz, C., Strybny, J. (2012): On the numerical modelling of filling-emptying systems for locks. 10th International Conference on Hydroinformatics 2012.
- Schulze, L., Thorenz C. (2013): Towards the CFD-modelling of multiscale-multiphase flow phenomena in a navigation lock. PIANC – SMART Rivers Conference 2013.
- Schulze, L., Thorenz C., Stamm, J. (2014): Entwicklung eines numerischen Ansatzes für die Modellierung von Lufteintrag und –transport in einem Schleusenfüllsystem. 37. Dresdner Wasserbaukolloquium 2014.
- Schulze, L., Rusche, H., Thorenz, C. (2015): Development of a Simulation Procedure for the 3D Modelling of the Filling Process in a Ship Lock Including Fluid Structure Interaction. In: Raúl Lopardo, Phillipe Rigo: 7th International PIANC-SMART Rivers Conference - Proceedings. Buenos Aires, 07-11 September 2015.



## **Koordinierte Bewirtschaftung von Stauufenketten – Modellierung und Betrieb**

**Netzplan-Nr.:** A39530370003

**Projektleiter:** Dr.-Ing. P. Schmitt-Heiderich, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserbauwerke (W3)

**E-Mail:** peter.schmitt-heiderich@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die lokale OW/Q-Regelung einer einzelnen Stauhaltung ist Stand der Technik und arbeitet in der Regel zuverlässig. Diese Regelung ist im Rahmen des FuE-Vorhabens "Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)" analysiert worden und die Ergebnisse sind in den BAWMitteilungen 96 dokumentiert.

Das aktuelle FuE-Projekt konzentriert sich auf eine Kette von Stauhaltungen, deren Betrieb gegenüber einer rein lokalen Regelung dann verbessert werden kann, wenn die lokalen Regler in vorgegebenen Grenzen „richtig gesteuert“ werden. Der BAW ist kein allgemeingültiges Verfahren bekannt, mit dem Ketten von Stauufen koordiniert bewirtschaftet werden.

Die Verbesserung der Bewirtschaftung einer Stauhaltungskette erfordert Eingriffe und komplexe Berechnungsalgorithmen auch auf der Ebene der lokalen OW/Q-Regelung. Daraus resultiert die Frage, wie aufwändig und sicher diese Algorithmen auf eine echtzeitfähige Zielplattform übertragen werden können.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Entwicklung einer standardisierten und optimierten Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten bietet zahlreiche Vorteile für die WSV, da die Standardisierung die Einrichtung einer koordinierten Bewirtschaftung erheblich vereinfacht und den Übertrag auf andere Stauketten ermöglicht. Vorteile einer koordinierten Bewirtschaftung sind eine Abflussvergleichmäßigung, ein Ausgleich von Defiziten, ein Ausgleich von Störungen, beispielsweise durch Pumpspeicherbetrieb oder Mischwassereinleitungen und eine bessere Beherrschung extremer Wetterereignisse. Im Hinblick auf eine zukünftige Zentralwarte, die eine Stauhaltungskette mit begrenztem personellem Aufwand führen soll, stellt eine koordinierte Bewirtschaftung die dafür notwendigen Informationen bereit.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Untersuchungsziel ist die Entwicklung eines allgemeingültigen Ansatzes einer koordinierten Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten. Hierfür sind folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Einrichtung und effektive Parametrisierung einer koordinierten Bewirtschaftung an Stauhaltungsketten. Hierfür sind die Algorithmen für die Bewirtschaftung allgemeingültig zu formulieren.
- Erarbeitung von vertieften Kenntnissen der Modellierung der Regelstrecke in Zusammenspiel mit Regelalgorithmen.
- Übertrag der koordinierten Bewirtschaftung auf eine Zielplattform und Nachweis, dass der Ansatz echtzeitfähig ist.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Die Umsetzung der koordinierten Bewirtschaftung ist an der Mosel und am Neckar vorgesehen. Die Bearbeitung erfordert ein vertieftes Wissen über partielle Differentialgleichungen im Zusammenspiel mit der Regelung und der Optimierung gekoppelter Systeme. Die Regelungstechnik spricht bei Regelstrecken, deren Verhalten durch partielle Differentialgleichungen beschrieben wird, von Strecken mit verteilten Parametern. Die Regelung von Strecken mit verteilten Parametern ist ein aktuelles Forschungsgebiet der Universitäten. Die BAW ist aufgrund begrenzter Personalkapazitäten nicht in der Lage, diese Fragestellungen in der notwendigen Tiefe und Schnelligkeit zu bearbeiten. Das dafür notwendige Spezialwissen ist in der Universität Stuttgart (Prof. Sawodny) vorhanden, die daher über

einen FuE-Kooperationsvertrag mit der Entwicklung eines allgemeingültigen Algorithmus zur koordinierten Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten beauftragt wurde.

### 3 Ergebnisse

Die C-Implementierung des 2014 fertiggestellten stationären Vorsteueralgorithmus und eines Solvers zur Lösung der darin auftretenden linear-quadratischen Optimierungsprobleme wurden fertiggestellt und getestet. Der Solver basiert auf einem beschleunigten Gradienten-Abstiegsverfahren (Rolle, 2015) und ermöglicht eine Apriori-Aussage über die maximal benötigte Anzahl an Optimierungsschritten bei einer geforderten Genauigkeit. Zudem ist die Lösbarkeit des Problems durch die vorgegebene Problemstruktur garantiert. Der Algorithmus ist daher für die Verwendung in Echtzeit-Anwendungen ideal, da innerhalb eines Zeitschritts die Ergebnisse bereitgestellt werden.

Mit Hilfe der frei verfügbaren und quelloffenen GNU Scientific Library (Galassi, 2009) werden Matrix- und andere grundlegende Rechenoperationen durchgeführt. Dies hat gegenüber einer eigenen Bibliothek den Vorteil von ausgereiften, vielfach erprobten und effizienten Grundrechenoperationen. Die Implementierung der eigentlichen Vorsteuerung ist damit als Quellcode vorhanden und unabhängig von weiteren (kommerziellen) Bibliotheken. Der Quellcode ist in ANSI – C programmiert, plattformunabhängig und kann mit beliebigen frei verfügbaren oder kommerziellen C - Compilern übersetzt werden. Dadurch ist sowohl die Möglichkeit der simulativen Erprobung in Matlab als auch die Verwendung in der Simulink Code-Generierung gegeben (Portierung auf Echtzeithardware).

Die einzelnen C-Funktionen werden mit automatisierten Tests geprüft. Ein Abgleich des Gesamtalgorithmus mit einer verifizierten Matlab-Implementierung erlaubt eine schnelle Überprüfung auf Funktionalität und Einhaltung von Schnittstellenimplementierungen (z.B. nach Modifikation am Quelltext). Die Abweichungen der C-Implementierung im Vergleich zur Matlab-Musterimplementierung liegen für den gesamten Algorithmus stabil mehrere Größenordnungen unterhalb der physikalischen Relevanz (bei den berechneten Wasserständen: Mikrometerbereich).

Für die Parametrierung der Vorsteuerung werden die benötigten Modelle der vereinfachten linearisierten Saint-Venantschen-Gleichungen (LSV-Modelle) mit Hilfe von geeigneten Testszenarios automatisiert identifiziert und verifiziert. Für die Identifikation wird entsprechend Bild 1 (rechtes Diagramm) bei konstantem OW-Spiegel dem stationären Zufluss ein Sinus-Signal mit linear variierender Frequenz überlagert. Der Frequenzbereich von mehreren Stunden bis zu einigen Minuten Periodendauer erlaubt die Erfassung der wesentlichen Dynamiken der gestauten Flussstauhaltung. Hierüber lassen sich die auftretenden abflussabhängigen Amplitudenüberhöhungen („Resonanzen“) zeigen. Auch das Ausschwingverhalten infolge unterschiedlicher Zuflusssprünge wird automatisiert ermittelt (linkes Diagramm in Bild 1).

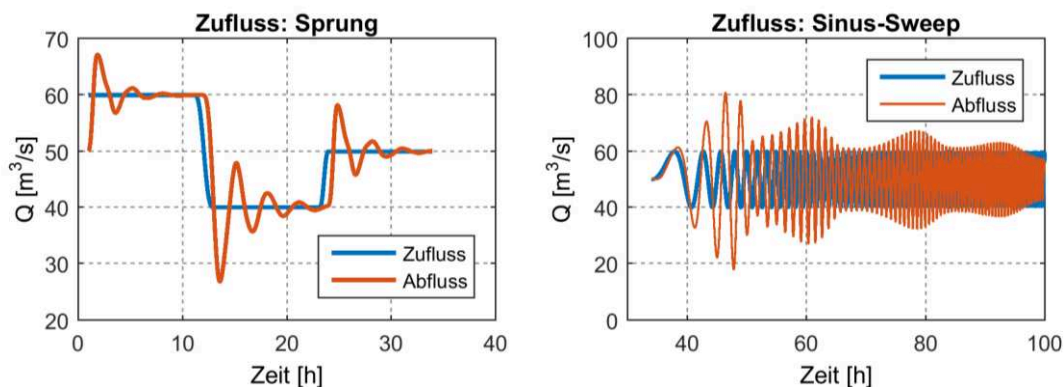


Bild 1: Testszenarien bei konstantem Stauziel von 86,2 m+NN und Niedrigwasser an der Stau-stufe Fankel; Links: Zuflusssprünge mit „Nachschwingen“ des Abflusses. Rechts: Sinus-Sweep mit konstanter Amplitude im Zufluss und Überhöhung im Abfluss

Bild 2 zeigt ein Szenario mit einer Führung des OW-Spiegels im Toleranzbereich bei konstantem Zufluss. Der Abfluss ergibt sich entsprechend der Ganglinie im unteren Diagramm. Die Kenntnis des Abflussverhaltens ist wichtig für den Nachweis der Funktion der Vorsteuerung. Das Vorgehen nach den Bildern 1 und 2 ist ohne weitere Anpassung auf alle Stauhaltungen anwendbar, die einen dominanten Zu- und Abfluss aufweisen.

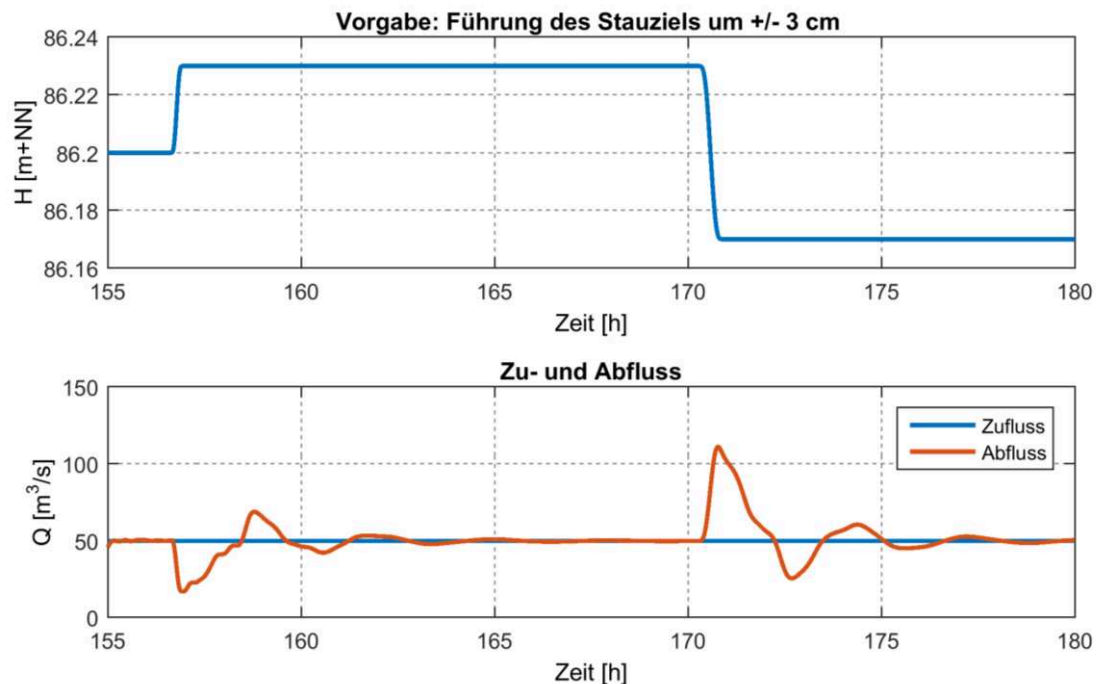


Bild 2: Testszenarium: Führung des Stauziels um +/- 3 cm innerhalb des Toleranzbereiches (5 cm) an der Staustufe Fankel

Für den effektiven Einsatz einer präzisierenden Vorsteuerung ist eine zuverlässige Vorhersage des Zuflusses in die erste Stauhaltung der Stauhaltungskette erforderlich. Die Abflussprognosen werden in hoher zeitlicher Auflösung für ca. 3 Stunden benötigt. Erste Voruntersuchungen zeigen, dass mit den Abflüssen an den Pegeln in Fremersdorf (Saar) und Perl sowie des tatsächlichen Abflusses am Wehr in Trier eine geeignete Kurzzeitprognose erstellt werden kann.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Im Jahr 2015 zeigte sich, dass das Arbeitsprogramm um die folgenden Arbeiten erweitert werden musste.

Arbeiten der Universität Stuttgart zum allgemeingültigen Ansatz einer koordinierten Bewirtschaftung; 2016-2017:

- Abgleich der Wehrprogrammsteuerung in den BAW-Modellen mit der Wehrsteuerung vor Ort.
- Erweiterung um das Modul Zuflussprognose für die untere Mosel.
- Erweiterung um das Modul Stauzielwechsel.
- Dokumentation.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2017 (beantragt).

## **5 Literatur**

- Rolle, B., (2015): Accelerated Gradient Methods for Model Predictive Control. Master Thesis, 27. Feb. 2015, Institut für Systemdynamik, Stuttgart
- Galassi, M. et al, (2009): GNU Scientific Library Reference Manual (3rd Ed.), ISBN 0954612078, <http://www.gnu.org/software/gsl/>

## **6 Veröffentlichungen**

- Amann, K.-U.; Arnold, E.; Sawodny, O. (2014): Comparison of model based feed-forward control strategies for impounded rivers, Control Conference (ECC), 2014 European , pp.1361,1366, 24-27 June 2014; doi: 10.1109/ECC.2014.6862565"

## **Entwicklung von Verfahrensweisen zur Simulation bewegter Objekte mit OpenFOAM**

**Netzplan-Nr.:** A39530370004

**Projektleiter:** Fabian Belzner, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserbauwerke (W3)

**E-Mail:** fabian.belzner@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Während die rein strömungsmechanischen Probleme im Bauwerksnahfeld oftmals in guter Qualität und Geschwindigkeit mit numerischen Werkzeugen behandelt werden können, stellt der Themenkomplex der bewegten Objekte noch immer einen Bereich dar, der nur mit Expertenwissen und für ausgesuchte Fragestellungen mit numerischen Modellen bearbeitbar ist.

Fragestellungen werden in der Abteilung W sowohl mit gegenständlichen Modellen, als auch mit numerischen Methoden untersucht. Somit ist es möglich für jede Fragestellung die geeignetste Untersuchungsmethode zu wählen.

In der Abteilung W soll der Einsatz des als Open-Source-Software verfügbaren Verfahrens OpenFOAM (Rusche, 2002) verstärkt werden. Momentan wird in den Referaten W1 und W3 bereits ein Großteil der numerischen Untersuchungen mit OpenFOAM bearbeitet, im Referat W4 laufen bereits erste Tests. Während die Durchführung von Simulationen mit ortsfesten Objekten unproblematisch ist, gibt es bisher nur für Einzelfälle Vorgehensweisen zur Simulation von Festkörperbewegungen in OpenFOAM. Häufige Fragestellungen sind die Simulation von fahrenden Schiffen in beschränkten Gewässern, von bewegten Verschlüssen oder eines Schleusenfüllprozesses mit einem eingeschränkt beweglichem Schiff in der Schleuse (vgl. Thorenz und Anke, 2013). Diese Fragestellungen stellen einen besonderen Schwierigkeitsgrad dar, da die Abstände zwischen bewegtem Objekt und festen Berandungen oft klein sind.

Im Rahmen der Projektarbeit mit numerischen Simulationsmethoden in der BAW wurden bisher die Methoden „Morphing“, „Chimera Grid / Overset Grid“ und „Generalized Grid Interface / Sliding Interface“ eingesetzt. Dabei zeigte sich, dass diese Methoden für einige Fragestellungen gut anwendbar (Overset: Frei fahrendes Schiff, Sliding Interface: Drucksegment, Propeller), für andere Fragestellungen (Schiff in der Schleuse während der Füllung) jedoch schwer umzusetzen oder ungeeignet sind. Insgesamt ist das Simulieren von bewegten Objekten in allen numerischen Verfahren noch kein Standardproblem, sondern für jeden einzelnen Anwendungsfall mit unterschiedlichen Methoden zu bearbeiten. Die in OpenFOAM vorhandenen Ansätze für die Simulation von bewegten Objekten weisen großes Potential auf, sind bisher aber nur in Einzelfällen für die Anforderungen der BAW adaptiert und getestet worden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Fragestellungen aus der WSV, wie beispielsweise die Simulation von fahrenden Schiffen in beschränkten Gewässern, von bewegten Verschlüssen oder eines Schleusenfüllprozesses mit einem eingeschränkt beweglichen Schiff in der Schleuse, die bisher einzig auf Grund der Anforderungen an die Modellierung bewegter Objekte im Labor untersucht werden mussten, könnten mit den zu entwickelnden Methoden auch mit einer numerischen Untersuchung beantwortet werden. Langfristig ist zu erwarten, dass damit die Effizienz und Qualität der Bearbeitung gesteigert werden kann.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchung ist die Entwicklung und/oder Implementierung einer oder mehrerer Verfahrensweisen, womit Fragestellungen zur Simulation bewegter Objekte mit OpenFOAM bearbeitet werden können. Es ist heute möglich, strömungsmechanische Berechnungen mit OpenFOAM mit vertretbarem Zeitaufwand durchzuführen. Gleiches soll für die Simulation bewegter Objekte gelten. Zukünftig

soll es ebenfalls ermöglicht werden, Simulationen um bewegte Objekte zu erweitern und diese damit im Rahmen der Projektarbeit besser zu berücksichtigen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Für die zu bearbeitende Fragestellung wird die Volume-of-Fluid-Methode genutzt. Bereits bestehende numerische Verfahren werden gegebenenfalls weiterentwickelt und neue Methoden zur Gitterverwaltung und zur Simulation bewegter Objekte hinzugefügt. Zur Validierung des entwickelten Verfahrens stehen in W3 Labormodelle zur Verfügung, an denen entsprechende Messungen durchgeführt werden können.

## 3 Ergebnisse

In OpenFOAM steht bereits heute die Methode „deforming mesh“ zur Verfügung. Dabei wird die Bewegung von Starrkörpern mit Hilfe der Verformung des Rechengitters realisiert. Die Methode bietet die Möglichkeit Translationen von Starrkörpern in alle drei Raumrichtungen und Rotationen von Starrkörpern um alle drei Raumachsen zu simulieren. Die Objektbewegung erfolgt in Abhängigkeit der aus dem Strömungsfeld berechneten Kräfte und Beschleunigungen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, einzelne oder mehrere Freiheitsgrade einzuschränken sowie die Bewegungsform durch verschiedene mechanische Feder- oder Dämpferelemente zu beeinflussen.

Die Klasse „simpleValve“ erlaubt es, die Flüsse über Zelloberflächen zeitabhängig anzupassen. Werden die Flüsse in übereinander liegenden Zellflächen nacheinander freigegeben, kann der Effekt eines sich nach oben öffnenden Schützes nachgebildet werden, ohne dass die Simulation dieses Schützes selbst erforderlich ist.

Die Methode „deforming mesh“ in Kombination mit der Klasse „simpleValve“ erlaubt die Simulation der Füllung von Schleusen sehr geringer Hubhöhen ( $< 3$  m), sofern der Füllmechanismus parallel zu den globalen Koordinatenachsen orientiert ist. Bei größeren Hubhöhen nimmt die Gitterqualität aufgrund der großen Verformung so stark ab, dass die Simulationen nicht weiter fortgeführt werden können. Die bei der Simulation der Füllung von Schleusen sehr geringer Hubhöhen (z.B. Seeschleusen) ermittelten Schiffskräfte zeigen qualitativ ein plausibles Verhalten und bspw. bei der Schleuse Holtenau auch das richtige zeitabhängige Verhalten, weichen jedoch quantitativ teilweise erheblich von den bei Laboruntersuchungen ermittelten Kräften ab. Die Ursachen hierfür sind noch unklar, da simulierter und aus dem gegenständlichen Modell ermittelter Volumenstrom in die Kammer eine sehr gute Übereinstimmung (qualitativer und quantitativer zeitlicher Verlauf) aufweisen (Bild 1) und auch das Strömungsbild insgesamt plausibel erscheint. Die Variation diverser numerischer und physikalischer Simulationsparameter lieferte bislang keine ausreichende Erklärung für diese Abweichungen.

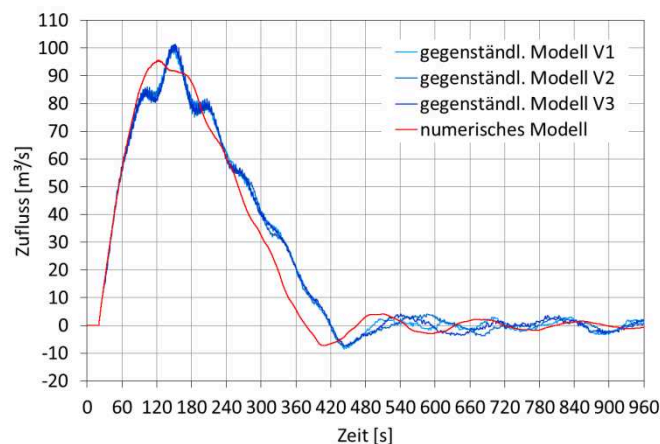


Bild 4: Kammerfüllung, Binnenschleusung:  $h_f=1,30$  m,  $v_0=0,02$  m/s

Der im Auftrag der BAW entwickelte Löser „lockFoam“ soll zukünftig die Simulation der Füllung von Schleusen großer Hubhöhen erlauben. Hierbei werden während der Simulation im unteren Bereich

der Schleusenammer zusätzliche Gitterzellen eingefügt, um die Gitterverformung durch „Morphing“ gering zu halten. Mit dem Löser „lockFoam“ ist die numerisch stabile Simulation der Füllung von Schleusen großer Fallhöhen möglich (Schulze et al., 2015). Der Löser ist dabei massenkonservativ. Die bei der Simulation ermittelten Schiffskräfte weichen jedoch ebenfalls erheblich von den bei Laboruntersuchungen ermittelten Kräften ab. Auch ist die Handhabung des Löserters äußerst komplex, so dass derzeit die Praxistauglichkeit noch nicht gegeben ist.

Bei der „Immersed Boundary“-Methode wird das Rechengitter nicht verformt, sondern diejenigen Zellen, welche mit dem bewegten Objekt überlappen, werden ganz oder teilweise abgeschaltet. Instabilitäten der Berechnung auf Grund stark deformierter Gitterzellen werden so vermieden und auch große Bewegungsumfänge stellen kein Problem dar. Jedoch ist bereits bekannt, dass diese Methode Reibungseinflüsse nur ungenügend wiedergeben kann. Es wurde eine Vergabe zur Erprobung dieser Methode mit einer Fragestellung der BAW durchgeführt. Damit soll die prinzipielle Anwendbarkeit der Methode überprüft werden.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016:

- Tests des Löserters „lockFoam“ zur Simulation größerer Bewegungen.
- Enge Betreuung der weiteren Entwicklung der „Immersed Boundary“-Methode für Fragestellungen der BAW.
- Tests kommerzieller Verfahren
- Veröffentlichung der vorliegenden Ergebnisse

2017:

- Enge Betreuung weiterer Vergaben.
- Durchführung eigener Entwicklungen.
- Konferenzbeitrag.
- Vergleich der entwickelten Methode mit kommerziellen Verfahren (z.B. Ansys Fluent oder CD-adapco STAR-CCM+).
- Vergleich mit der netzunabhängigen GPU-parallelisierten Smoothed Particle Hydrodynamics (GPUSPH) Methode.

2018:

- Projektrelevanter Anwendungsfall.
- Validierung der entwickelten Methode durch die Simulation einer Schleusenfüllung mit bewegtem Schiff und den Vergleich mit den Ergebnissen des Schleusenversuchsstands I in Halle III oder des Schleusenversuchsstands II in Halle V.
- Bericht, Journal Paper, ggf. Promotionsarbeit.

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2018.

#### 5 Literatur

Rusche, H. (2002): Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions. Doctoral Thesis. Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, Great Britain. Department of Mechanical Engineering.

#### 6 Veröffentlichungen

Schulze, L., Rusche, H., Thorenz, C. (2015): Developement of a Simulation Procedure for the 3D Modellung of the Filling Process in a Ship Lock Including Fluid Structure Interaction. In: Raúl Lopardo, Phillipe Rigo: 7th International PIANC-SMART Rivers Conference - Proceedings. Buenos Aires, 07-11 September 2015

Thorenz, C., Anke, J. (2013): Evaluation of ship forces for a through-the-gate filling system. In: Philippe Rigo, Milou Wolters: Proceedings, SMART Rivers Conference 2013, 23.-27.09.2013, Maastricht/Liège, Belgien.

## **Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle**

**Netzplan-Nr.:** A39530410038

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. D. Spitzer, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat  
Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)

**E-Mail:** detlef.spitzer@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Infolge immer größerer und stärker motorisierter Fahrzeuge gewinnt die Belastung von Gewässersohle und -ufer durch Schraubenstrahlen auf vielen Bundeswasserstraßen an Bedeutung und kann die Bemessung von Deckwerken maßgebend bestimmen. Unsicherheiten bei der Anwendung vorliegender Verfahren zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen durch Propulsionsströmungen gaben Anlass dazu, den Kenntnisstand grundlegend aufzuarbeiten. Dies erfolgte im Rahmen des F&E-Projekts in enger Zusammenarbeit der BAW mit dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig zunächst auf Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche und der Auswertung vorliegender Messdaten. Die Analysen führten zu neuen Berechnungsansätzen für die zeitliche Entwicklung des Schraubenkolks und der Endkolkentiefe. Mit diesen kann die schraubenstrahlinduzierte Kolkentiefe mit einer höheren Genauigkeit und in einem größeren Gültigkeitsbereich prognostiziert werden als mit bisherigen Ansätzen. Allerdings zeigte sich ein erheblicher Forschungsbedarf. Um bestehende Unsicherheiten aus den Wirkungen von Schiffsantrieb, Heckform und Ruderausbildung auf die Strahlausbreitung, bei der Bestimmung des sohnahen Strömungsfeldes sowie in der Erfassung der zeitlichen Entwicklung des Kolks in unterschiedlichen Sohlenmaterialien zu minimieren, sind weiterführende physikalische Modelluntersuchungen erforderlich.

Die durch den Schraubenstrahl induzierte Sohlenerosion ist ein sehr komplexer Vorgang und durch einfache analytische Ansätze nur schwer zu erfassen. Ein Lösungsweg zur Verbesserung und Erweiterung vorhandener semiempirischer Berechnungsmethoden wird in der Anwendung effizienter hydronumerischer Verfahren für zeitabhängige turbulente Strömungen gesehen. Um die Anwendbarkeit für die Simulation der Schraubenstrahlausbreitung und der resultierenden Sohlenerosion zu überprüfen, wurden daher im Rahmen des Projekts auch Berechnungen mit HN-Modellen durchgeführt.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Untersuchungen führen zu einer Verbesserung der bestehenden Berechnungsverfahren zum Einfluss von Schraubenstrahlen auf die Sohlenerosion, die u. a. in die von der BAW für die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen entwickelten Software GBBSOFT Eingang finden. Zudem können die Messdaten aus experimentellen Untersuchungen für die Kalibrierung numerischer Verfahren herangezogen werden. Das Fernziel besteht im Einsatz eines geeigneten numerischen Verfahrens als Schnittstelle zum Softwarepaket GBBSOFT.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Nach dem erfolgten Abschluss der geplanten Modellversuche zum Schraubenkolk beim Manövrieren und Anfahren von Schiffen wurden zu Beginn des Berichtszeitraumes die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Kolkbildung wie Propellerdrehzahl, Sohlensediment, Propeller-Ruder-Anordnung, Höhenlage der Propellerachse über der Sohle und Versuchsdauer anhand des verfügbaren Datenmaterials analysiert, um ggf. Datenlücken aufzuzeigen (Schneider, 2015). Zur Vervollständigung der bisherigen Untersuchungen zur Kolkbildung von Schraubenstrahlen war das Ziel, den Einfluss der geometrischen und kinematischen Randbedingungen auf die Strahlhydraulik zu untersuchen. Dies erfolgte durch Messungen für insgesamt 81 Parameterkombinationen. Dabei wurden für 9 verschiedene Schiff-Propeller-Ruder-Anordnungen und 9 unterschiedliche Propellerüberdeckungshöhen bzw. Sohlabstände des Propellers die Anfangsstrahlgeschwindigkeit, der Strahlausbreitungswinkel und die maximale sohlennahe Strahlgeschwindigkeit ermittelt. Außerdem wurden für diese Varianten das Drehmoment und die Schubkraft des Propellers registriert.

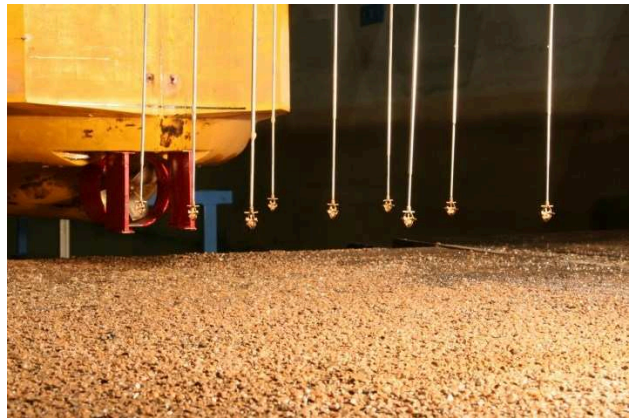


## 2 Untersuchungsmethoden

Die Ermittlung der induzierten Strahlgeschwindigkeit und der Strahlausbreitung im Nahbereich der Schiffsschraube erfolgte mit mehreren Messverfahren. Umfangreiche Messungen wurden mit einem neuartigen LED-basierten PIV vorgenommen (Nardone et al., 2014). Es zeigte sich, dass mit diesem Verfahren qualitative Aussagen getroffen werden können, jedoch eine hinreichend genaue quantitative Erfassung des hochturbulenten Strömungsfeldes nicht möglich ist. Zur Messung der propellerinduzierten Strahlgeschwindigkeit wurde daher die Eignung eines Vectrinos (ADV-Sonde), von Mikroflügeln sowie Prandtl-Sonden geprüft (Bild 1). Vergleichsmessungen zeigten, dass für die Messaufgabe die konventionelle Prandtl-Sonde verlässliche Ergebnisse liefert und verwendet werden kann.



*Bild 1: Messung der propellerinduzierten Strahlgeschwindigkeit mit Vectrino- und Prandtl-Sonde*



*Bild 2: Messharfe aus Mikroflügeln zur Aufmessung des sohlnahen Geschwindigkeitsfeldes*

Die Aufnahme des sohlnahen Strömungsfeldes hinter dem Schiff erfolgte in einem vorgegebenen Messraster. Hierfür wurde, wie bei den Messungen im Schraubenstrahl, zunächst die Vectrino-Sonde verwendet, womit eine dreidimensionale Analyse der Strömung ermöglicht wurde (Inselmann, 2014). Da sich im sohlnahen Bereich die vertikale und laterale Geschwindigkeitskomponente im Verhältnis zur Längskomponente als klein erwies, wurden zur Verringerung des Mess- und Auswerteaufwandes im Weiteren Mikroflügel für die Bestimmung der Längsgeschwindigkeit herangezogen. Durch den Aufbau einer Messharfe aus 9 Mikroflügeln (Bild 2) konnte die Messdauer für die 81 geplanten Versuche verkürzt werden. Zusätzlich zu den sohlparallelen Messungen wurde mit einem Mikroflügel in einer Lotrechten hinter dem Propeller das vertikale Geschwindigkeitsprofil bis zur Sohle für die Ermittlung der unteren Strahlgrenze erfasst.

## 3 Ergebnisse

Die Axialgeschwindigkeit im Schraubenstrahl wurde für die untersuchten Schiff-Propeller-Ruder-Konfigurationen in einem parallelen Abstand von einem halben Propellerdurchmesser hinter der Propellerebene aufgenommen. Bild 3 zeigt das Messraster mit insgesamt 240 Messpunkten, worin der Durchstoßpunkt der Propellerachse hervorgehoben ist.

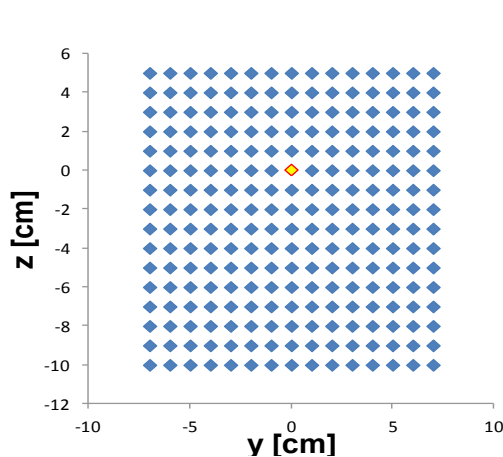


Bild 3: Messraster hinter der Propellerebene für die Ermittlung der Anfangsstrahlgeschwindigkeit

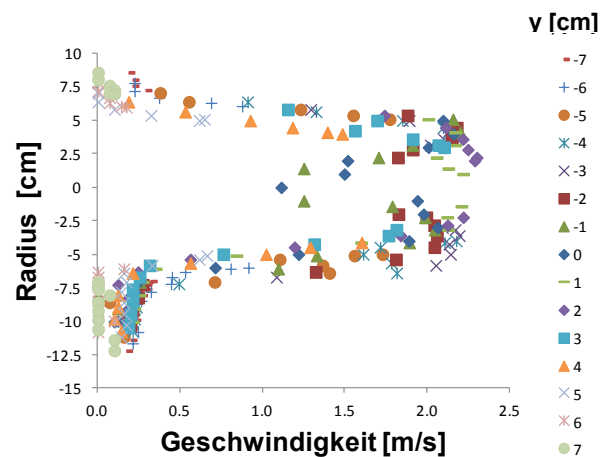


Bild 4: Axialgeschwindigkeiten für einen Versuch mit Kaplanpropeller in Kortdüse ohne Ruder

In Bild 4 sind beispielhaft die im Modellversuch gemessenen Längsgeschwindigkeiten für die Ausstattung des Schiffs mit dem Kaplanpropeller in Kortdüse (ohne Ruder) dargestellt. Es zeigt sich darin die zu erwartende rotationssymmetrische Strahlgeometrie mit abnehmenden Axialgeschwindigkeiten im Bereich der Propellernabe.

Ein im Modell mit der Messharfe 1 cm über der Sohle aus Feinkies ausgewertetes sohnnahes Geschwindigkeitsfeld ist beispielhaft für den Versuch mit Kaplanpropeller, Kortdüse und Doppelruder in Bild 5 dargestellt. Die darin ausgewiesenen Abstände x beziehen sich auf die Position des Propellers y im Modell. Um die Strahlgrenze und die maximale Sohlgeschwindigkeit in dem hier sehr lang gestreckten Einflussbereich des Schraubenstrahls erfassen zu können, musste die Länge des Messgebietes an der Sohle deutlich vergrößert werden. Die Propellerachse lag in diesem Versuch bei  $y = 62,5$  cm und die Propellerblattebene bei  $x = 9,5$  cm. Die maximale Sohlgeschwindigkeit wurde im Abstand von 66,2 cm hinter der Propellerblattebene bestimmt und betrug 71,1 cm/s.

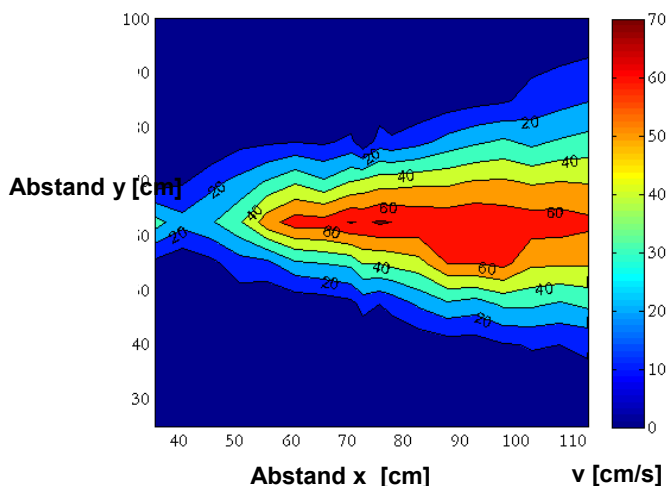


Bild 5: Sohnnahe Geschwindigkeitsfeld für die Anordnung Kaplanpropeller mit Kortdüse und Doppelruder am Schiff

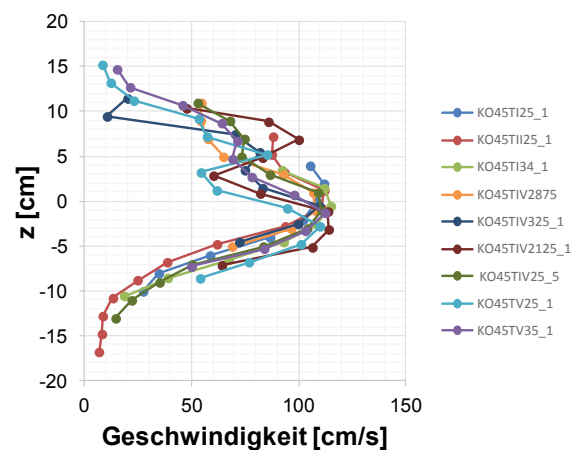


Bild 6: Vertikale Geschwindigkeitsprofile für die Anordnung nach Bild 5 zur Ermittlung des Strahlablenkungswinkels

Bild 6 zeigt vertikale Geschwindigkeitsprofile zur Bestimmung der Ablenkung der Strahlachse hinter dem Schiff für die Anordnung Kaplanpropeller mit Kortdüse ohne Ruder. In der Bildlegende sind die bei gleichbleibender Drehzahl von  $45 \text{ s}^{-1}$  in dieser Versuchsreihe veränderten Schiffstiefgänge und Wassertiefen bei insgesamt 9 Versuchsvarianten ausgewiesen. Die im Abstand von 3,5 Propeller-

durchmessen mit der Prandtl-Sonde in der verlängerten Propellerachse ermittelten Geschwindigkeitsprofile zeigen, dass sich die veränderten Randbedingungen auf die Geschwindigkeitsverteilung und den Ablenkungswinkel der Strahlachse auswirken. Eine detaillierte Auswertung zum Einfluss der Überdeckungshöhe und des Sohlabstandes des Propellers auf die Strahlausbreitung muss noch erfolgen.

Die untere Strahlgrenze des Schraubenstrahls wurde anhand des Längsprofils der sohnahen Geschwindigkeit in der Propellerachse bestimmt. In dem zuvor beschriebenen Modellversuch trifft der Strahl ca. 17 cm hinter der Propellerblattebene auf die Sohle.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Aufgrund unvorhergesehener personeller Engpässe sowie technischer Probleme bei der Anwendung eines LED-basierten PIV-Verfahrens zur Erfassung des Geschwindigkeitsfeldes im Schraubenstrahl waren Rückstände in der Projektbearbeitung zu verzeichnen. Auch die sich schwerpunktmäßig auf die Schraubenstrahlhydraulik konzentrierenden Versuche führten aufgrund des hochturbulenten Strömungsfeldes hinter der Schiffsschraube zu Verzögerungen durch Eignungsprüfung von Messtechniken, notwendigen Wiederholungsmessungen und Erweiterungen des Messgebietes.

Für den Abschluss des FuE-Projekts wurde zwischen der BAW und dem LWI nachstehender Zeitplan abgestimmt:

31.01.2016	Abschluss der Untersuchungen zur Schraubenstrahlhydraulik als Kurzbericht
15.02.2016	Zusammenstellung der Ergebnisse zu den Langzeitmessungen der Endkolkentiefe
31.03.2016	Abfassung der Zwischenberichte „Strömungsfeld im Schraubenstrahl über fester Sohle“ und „Kolkentiefe infolge kurzfristiger Belastungen“
30.06.2016	Abschlussbericht zu den experimentellen Untersuchungen und Ableitung einer semi-empirischen Formel zur Kolkiefenbestimmung infolge eines Schraubenstrahlgriffs
31.12.2016	Abschlussbericht zum FuE-Projekt „Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle“

Laufzeit des Vorhabens: 2006 bis 2016.

#### 5 Literatur

- Inselmann, L. (2014): Auswertung physikalischer Modellversuche zur Erfassung des Geschwindigkeitsfeldes hinter einem Schiffspropeller unter Verwendung einer ADV-Sonde über einer rauen Sohle und Vergleich mit den Ergebnissen der Versuche über einer glatten Sohle, Bachelorarbeit, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig
- Schneider, C. (2015): Auswertung von Modelluntersuchungen der TU-Braunschweig zur Kolkbildung aus dem Schraubstrahl von modernen Binnenschiffen, Bachelorarbeit, Institut für Hydromechanik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Branß, T. (2015): Einfluss von Sohlabstand, Tiefgang und Propellerdrehzahl auf die Geometrie eines mittels Kaplanpropeller induzierten Kolkes. Studienarbeit, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, Juni 2015
- Vollmer, D.E. (2015): Kolkentwicklung infolge der Schraubenstrahlbelastung anfahrender Schiffe. Studienarbeit, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, Juli 2015

#### 6 Veröffentlichungen

- Nardone, P., Geisenhainer, P., Koll, Ka., Di Cristo, C.: Experimental investigation of a propeller jet induced velocity field, Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow 2014, 3–5 Sept. 2014, Lausanne, Switzerland. Schleiss et al. (Eds), 241–249
- Núñez-González, F., Koll, Ka., Söhngen, B., Spitzer, D. (2016): Scour geometry and near bed velocities induced by an experimental ship propeller jet. Int. Symp. on River Sedimentation, Sept. 2016, Stuttgart, Germany (submitted)

## **Erweiterung des Binnenschiffsführungssimulators um die Berechnung schiffsinduzierter Wellen und Verbesserung des fahrdynamischen Modells**

**Netzplan-Nr.:** A39530470003

**Projektleiter:** T. Dettmann, Dipl.-Ing. R. Zentgraf, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Fachgruppe Schiffsführungssimulation (W 4), Referat Flussbau (W2)

**E-Mail:** thorsten.dettmann@baw.de, rolf.zentgraf@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In konsequenter Weiterführung der BAW-eigenen Entwicklung von Werkzeugen zur Beantwortung verkehrswasserbaulicher Fragestellungen wurde Ende 2009 durch die Bundesanstalt für Wasserbau für den Bereich Binnenschiffahrt der Schiffsführungssimulator ANS5000 beschafft. Ziel dieser Beschaffung war es, diesen Simulator soweit zu ertüchtigen, dass die in der BAW entwickelten Methoden zur Beschreibung der Fahrdynamik von Binnenschiffen in den Simulator integriert werden können, um ihn für verkehrswasserbauliche Untersuchungen einsetzen zu können. Im Vorfeld der Beschaffung des Schiffsführungssimulators ANS5000 wurde durch einen international anerkannten Fachexperten eine Analyse hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen der in Europa vorhandenen Schiffsführungssimulatoren bezüglich der Bemessung von Schifffahrtsstraßen erstellt, die unter anderem zu folgenden Ergebnissen führte:

Stand der Technik bei den Herstellern zum Zeitpunkt der Beschaffung:

- Von fast allen Herstellern wurde bestätigt, dass in den vorangegangenen Jahren die Verbesserung des Sichtsystems vorrangig betrieben wurde und weniger eine Verbesserung der mathematischen Modelle.
- Viele Simulatoren wurden überwiegend als STCW-konforme (Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers) und damit relativ einfache Simulatoren geordert und verkauft.
- Die Entwicklung neuer und verbesserter mathematischer Modelle ist sehr kostenintensiv, was bei dem steigendem Konkurrenz- und Preisdruck nicht durchsetzbar war.
- Bei den kommerziellen Herstellern fehlt in vielen Fällen das notwendige direkte Know-how im Bereich Hydrodynamik/Hydraulik.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Aus dem Trend, dass immer größere Schiffe in den vorhandenen Wasserstraßen fahren (überlange Verbände auf dem Rhein, üGMS auf dem Neckar), gewinnen Fragestellungen wie z. B. nach dem Einfluss von Querströmungen auf die Fahrt eines Binnenschiffes, nach der Wechselwirkung Schiff/Schiff bzw. Schiff/Wasserstraße, nach dem Verkehrsflächenbedarf in der Manöverfahrt und nach Squat und Banking immer mehr an Bedeutung. Viele dieser Fragen lassen sich nur noch durch komplexe Simulationen der Schiffsbewegung beantworten, in denen das Schiff durch einen Bahnregler oder durch Schiffsführer nach Sicht gesteuert wird.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Der in der BAW Karlsruhe vorhandene Binnenschiffsführungssimulator ANS5000 wurde seitens des Herstellers soweit an die Belange der Binnenschiffahrt angepasst, dass die Steuerung des Simulationsschiffes über eine Binnenschiffsbrücke nach Sicht und Radar mit originalen Bedienelementen erfolgt. Alle notwendigen Anzeigeelemente erscheinen generisch auf Bildschirmen und gewährleisten so ein Höchstmaß an Flexibilität, indem die Anzeigeelemente an die unterschiedlichsten Schiffstypen bzw. Untersuchungsziele angepasst werden können.

Die in dem ANS5000 enthaltenen Modellverfahren sollen durch in der BAW entwickelte Verfahren erweitert werden, um den ANS5000 im Zusammenspiel mit den flussbaulichen HN-Modellen zum Werkzeug zur Beantwortung verkehrswasserbaulicher Fragestellungen zu ertüchtigen. Damit soll es möglich werden, insbesondere Manöversituationen wie z. B. Schleusen- oder Hafeneinfahrten, Fahrsituationen mit Wechselwirkung Schiff/Schiff und Schiff/Wasserstraße wie Brückendurchfahrten oder

die Durchfahrung von 2D-Strömungsfeldern, die die Fahrt des Schiffes beeinträchtigen, untersuchen und beurteilen zu können.

## 2 Untersuchungsmethoden

Numerische Methoden:

- Entwicklung von Rudermodellen (Heck- und Bugstrahlruder) basierend auf Ansätzen aus der Seeschifffahrt. Überarbeitung dieser Ansätze mittels Ergebnissen aus Modellversuchen sowie numerischen Berechnungen (BAW, 2005; Müller, 2009; Tenzer, 2009; SNAME, 1988/1989; Söding, 1986)
- Entwicklung eines Wellenmodells auf Basis der zuerst von Boussinesq 1872 für konstante Wassertiefe veröffentlichte und nach ihm benannten Boussinesq-Wellengleichungen (BoWave 2D) (Schröter, 2007-2014)
- Erhöhung der Auflösung des fahrdynamischen Modells des ANS5000 durch Implementierung von in der BAW entwickelten Modellverfahren z.B. durch Erweiterung des Ansatzes von Abkowitz (siehe z.B. Brix, 1993), speziell für die Einflüsse flachen Wassers
- Verbesserung der Kollisionserkennung und -modellierung (z.B. Simulation von Gleitmolen in der Binnenschifffahrt)

Physikalische Methoden:

- Einmessung von fahrenden Binnenschiffen und Aufzeichnung aller Maschinen- und Ruderkommandos mit anschließender Kalibrierung der Schiffsmodelle für den ANS5000 und Erstellung zugehöriger Validierungsdokumente (Cap. Brix, 1993)
- Durchführung von Schleppversuchen mit unterschiedlichen Schiffsmodellen inklusive Messung der Kräfte, die auf das Schiff wirken, und Messung der schiffsinduzierten Wellen und deren Ausbreitung.
- Entwurf und Bau eines Binnenreferenzschiffsmodells: Erstellung eines BAW-eigenen Entwurfes für ein typisches modernes 135 m langes üGMS, Bau eines langlebigen Modells im Maßstab 1:16 und Durchführung von diversen Modellversuchen in Tief- und Flachwasser zur Schaffung eines vollständigen Datensatzes für Fahrt- und Manöversituationen zur umfassenden Kalibrierung von Modellverfahren für den Binnenschiffsführungssimulator und zur Ermittlung der Verlässlichkeit numerischer Methoden für die Modellierung.

## 3 Ergebnisse

Im Jahr 2015 wurden ein 101 m und ein 135 m langes Kabinenschiff eingemessen und für den Simulator modelliert. Beide Schiffe werden im Gegensatz zu konventionellen Binnenschiffen mit Hilfe von Pods angetrieben und gesteuert und besitzen andere nautische Eigenschaften, als die bisher modellierten Schiffe. Damit verfügt die BAW für den Simulator inzwischen über 14 virtuelle Schiffseinheiten unterschiedlicher Abmessungen und Bauart. Diese Flotte soll im Jahr 2016 bei entsprechenden Bedarf erweitert werden.

Von dem Hersteller des ANS5000 wurde in enger Zusammenarbeit mit der BAW die PlugIn-Schnittstelle, mit deren Hilfe neue Modellverfahren in den Simulator integriert werden können, in ihrer Leistungsfähigkeit deutlich erweitert. Die Tests der neuen Schnittstelle wurden mit einem guten Ergebnis abgeschlossen. Da sich wegen der Softwarearchitektur die neue Schnittstelle nur in den ANS6000 integrieren lässt, wurde im Jahr 2015 ein Softwareupgrade auf ANS6000 durchgeführt und bei dieser Gelegenheit das Sichtsystem auf DisiXtreme modernisiert und die Anzahl der Sichtkanäle erweitert. Der Umbau des Simulators und die Installation der Software ANS6000 wurden im Dezember 2015 abgeschlossen. Die endgültige Inbetriebnahme des neuen Sichtsystems DisiXtreme ist für März 2016 geplant. Gegenwärtig werden alle bisher in der BAW entwickelten Teilmodelle an den ANS6000 angepasst und getestet.

Innerhalb des Simulators erfolgt die Kollisionserkennung auf der Grundlage von vier Tiefenlinien in der elektronischen Seekarte ENC. Von diesen aus wird die Entfernung zur Mittschiffsachse bestimmt und die halbe Schiffsbreite abgezogen. Da mit dem Simulator in der BAW die Wirkung von Gleitmolen untersucht werden soll, ist diese Art der Kollisionserkennung zu ungenau. Aus diesem Grund wurde eine Kollisionserkennung durch Vergleich der 3D Geometrie des Schiffes und der Wasserstraße

entwickelt. Diese neue Kollisionserkennung muss noch mit dem Upgrade des Schiffsführungssimulators auf den Typ ANS6000 in den Simulator integriert werden.

Im Jahr 2014 wurde der Bau des Modells für das Referenzschiff der BAW abgeschlossen. In einer ersten Versuchsserie wurden im tiefen Wasser Schleppversuche und Planar motion mechanism (PMM) Tests durchgeführt. Die Aufbereitung der Messdaten sowie die Durchführung der Flachwasserversuche läuft seit dem Jahr 2015.



*Bild 4: Modernisierter Binnenschiffsführungssimulator ANS6000 mit dem Sichtsystem DisiXtreme*

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2016:
- Verschmelzung fahrdynamischer Modellverfahren der BAW mit den im ANS6000 enthaltenen Verfahren
  - Erweiterung der Kollisionsmodelle des ANS6000, Modellierung von Gleitmolen
  - Modellierung der Ansaugeffekte zum Ufer auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse aus dem Verfahren BoWave und alternativ durch Erweiterung des Ansatzes von Abkowitz (siehe z.B. Brix, 1993)
  - Validierung von CFD-Berechnungen (Feldmethoden) zur Kalibrierung einzelner Modellverfahren und Erstellung einer Routine für derartige Kalibrierungen

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2016.

#### 5 Literatur

- BAW (2005): Abschlussbericht zum FuE Projekt 8154 Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässerberandung. BAW-Bericht. Karlsruhe.
- Cap. Brix, J. (1993): Manoeuvring technical manual. Seehafenverlag Hamburg
- Müller, S.-B.; Tenzer, M. (2009): Ruder- und Bugstrahlruderkräfte (Kurzbezeichnung). Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme. Universität Duisburg-Essen. Bericht Nr. F-007/2009.
- SNAME (1988/1989): Principles of naval architecture. Band 1: Stability and strength. Band2: Resistance, propulsion and vibration. Band 3: Motions in waves and controllability.
- Söding, H. (1986): Kräfte am Ruder; In: Handbuch der Werften XVIII, S. 47–57.

## 6 Veröffentlichungen

- Gourlay, T., Ha, J.H., Mucha, P., Uliczka, K. (2015): Sinkage and Trim of Modern Container Ships in Shallow Water. Proceedings of the Australasian Coasts and Ports Conference, Auckland, NZ, 2015.
- Mucha, P., el Moctar, O. (2015): Revisiting mathematical models for maneuvering prediction based on modified Taylor-series expansions. Ship Technology Research: Schiffstechnik. 62(2):81-96, 2015.
- Schröter, A. (2007-2014): Numerische Modellierung schiffsinduzierter Wellen im regulären Projektbetrieb der BAW auf Basis der Boussinesq-Wellengleichungen. Untersuchungsabschnitt 1 bis 4. Bad Sachsa



## **Integration mehrdimensionaler Modelle in die GBBSOft**

**Netzplan-Nr.:** A39530470004

**Projektleiter/in:** S. Doychev, Prof. Dr. B. Söhngen, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)

**E-Mail:** svetlana.doychev@baw.de, bernhard.soehngen@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die bestehende GBB-Software berechnet die schiffserzeugten Belastungen aus dem Primärwellenfeld, den Sekundärwellen und dem Schraubenstrahl. In Bezug auf die Schiffsform und die Schiffsgeschwindigkeit basieren die dafür entwickelten Algorithmen auf worst-case-Szenarien. Das Ergebnis liegt somit zwar immer auf der sicheren Seite, ist aber für spezielle Schiffstypen, z. B. mit schlanken Bug- und Heckformen, ungenau. Durch die Einbindung eines mehrdimensionalen Modells, das die Schiffsgeometrie berücksichtigt und flexibel bezüglich der Schiffsgeschwindigkeit ist, wird ein genaueres und detailliertes Ergebnis erwartet. Ein weiterer Vorteil des mehrdimensionalen Modells besteht in der freien Vorgabe der Sohltopografie, was die Berechnung für Kanäle und Flüsse mit nichtregulären Querschnitten ermöglicht.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Gegenüber der aktuellen Version GBBSOft erlaubt das zweidimensionale Modell genauere Aussagen über die Wellenhöhen und Geschwindigkeiten, insbesondere bei der Fahrt in Gewässern mit einer kleinen Böschungseigung. Des Weiteren wird die Berechnung der Uferbelastungen in nichtregulären Kanal- und Flussquerschnitten möglich. Da die Bug- und Heckform eine entscheidende Rolle bei der Bildung des Wellensystems spielen, besteht ein zusätzlicher Vorteil des Modells darin, dass die Schiffsgeometrie mit in die Berechnung einfließt. Der wirtschaftliche Nutzen der erweiterten Version besteht darin, dass mit genaueren Vorhersagen der Wellenhöhen und der Strömungsgeschwindigkeiten die erforderliche Steingröße nicht mehr überschätzt wird und somit die Materialkosten reduziert werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Es soll ein numerisches Programm erstellt werden, das in Abhängigkeit vom Kanalquerschnitt, von der Schiffsgeometrie und der Schiffsgeschwindigkeit das Wellenbild eines stationär fahrenden Schiffes berechnet. Dabei werden der Grenzschichteinfluss am Schiff, der Sohlreibungswiderstand und die Schwimmbedingung am Schiff berücksichtigt. Das Endziel des Vorhabens ist eine neue Version der GBBSOft, die die Möglichkeit bietet, schiffserzeugte Wellen und deren Auf- und Rücklauf am Ufer auf einem handelsüblichen PC innerhalb weniger Minuten numerisch zu simulieren und daraus die schiffsinduzierten Uferbelastungen zu ermitteln.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Das Modell nutzt für die Wellenberechnung den potentialtheoretischen Ansatz, bei dem das Geschwindigkeitsfeld als Gradient eines Geschwindigkeitspotenzials dargestellt wird. In Übereinstimmung mit der Schlankkörpertheorie wird anstelle vom Schiff eine Verdrängungsrandbedingung gesetzt, die von der Schiffsgeometrie und der Schiffsgeschwindigkeit abhängt, Chen, X.-N. (1999).

### **3 Ergebnisse**

Das Projekt ruhte im Jahre 2015, da die Projektleitung vakant war.

### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Die Arbeiten zu diesem Projekt werden in 2016 abgeschlossen.



Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

## **5 Literatur**

Chen, X.-N. (1999): Hydrodynamics of Wave-Making in Shallow Water. Dissertation. Universität Stuttgart. Shaker Verlag

## **6 Veröffentlichungen**

Doychev, S., Söhngen, B. (2013): Impact of ship size on induced waves and currents in confined waters. Third International Conference of Ship Maneuvering in Shallow and Confined Water. Gent, Belgien.

## **Untersuchungen zur Sohl- und Uferbeanspruchung aus Schlagflächenantrieben**

**Netzplan-Nr.:** A39530470005

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. B. Söhngen, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)

**E-Mail:** bernhard.soehngen@baw.de

### **1 Problemstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Schiffspropeller verursachen insbesondere bei kleinen Flottwassertiefen große Sohlbeanspruchungen, die zu Auskolkungen bis hin zur Resuspension von Sohlmaterial führen können. Dies liegt u. a. an der Ausbreitungscharakteristik des drallbehafteten Propellerstrahls, der eine große Erhaltungstendenz aufweist. Es stellt sich deshalb die Frage, ob es alternative Antriebssysteme von Binnenschiffen zu heute üblichen Schiffspropellern gibt, die bei gleichem Schub geringere Sohlbeanspruchungen verursachen und ggf. sogar günstigere Wirkungsgrade aufweisen, um Treibstoffkosten einzusparen. Eine mögliche alternative Antriebsform ist die Schlagfläche. Hierbei muss man sich eine auf- und ab bzw. seitwärts schwingende Fläche vorstellen wie bei der Schwanzflosse eines Delphins oder eines Fisches. Berechnungen und eine umfangreiche Literaturrecherche zeigen, dass Schlagflächenantriebe höhere Wirkungsgrade aufweisen können als herkömmliche Binnenschiffspropeller und voraussichtlich geringere Sohlbelastungen verursachen. Diese Aussagen sollen im Rahmen des Vorhabens durch experimentelle Untersuchungen mit einem Schlagflächenroboter gestützt werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Durch den Einsatz von Schiffsschrauben als Standardantrieb von Wasserfahrzeugen können Fundamente von Wasserbauwerken unterspült, Ufer beschädigt und Gewässerböden erodiert werden. Weiterhin leiden Pflanzen und Tier-Populationen in den Gewässern. Alternative Antriebe, wie z.B. Schlagflächenantriebe, können dazu beitragen, die propulsionsbedingten Belastungen zu begrenzen. Weiterhin könnten sie bekannte Nachteile von Schraubenantrieben reduzieren, die bei wechselnden Einsatzbedingungen wie unterschiedliche Wassertiefen, Strömungsgeschwindigkeiten, Beladungszustände, Fahrt als Einzelfahrzeug oder im Verband, Propellerwirkungsgrade aufweisen, die im Durchschnitt bei 0,3 – 0,5 liegen, obwohl theoretisch Werte bis etwa 0,6 erreichbar wären. Schlagflächenantriebe haben nach Literaturrecherchen diesbezüglich Vorteile, wenn die Schlagbewegungen an die Fahrtgeschwindigkeit angepasst werden mit stärker zur Bewegungsrichtung hin gedrehten Schlagflächen (pitch) und langsameren Hubbewegungen beim Anfahren oder bei langsamer Fahrt und geringem pitch und schnelleren Hubbewegungen bei schneller Fahrt. Dies zeigen z. B. Untersuchungen u.a. von Anderson (1998) und eigene Ansätze auf Basis der Tragflügeltheorie, die Wirkungsgrade bis ca. 0,8 für erreichbar halten.

### **2 Untersuchungsziel**

Im Rahmen des Vorhabens werden experimentelle Untersuchungen zum Wirkungsgrad und zur Sohlbeanspruchung aus einem Schlagflächenantrieb durchgeführt. Die Ergebnisse der Modelluntersuchungen sollen bei vielversprechenden Ergebnissen in einen FuE-Antrag münden, mit dem externe Forschungsmittel erschlossen werden. Das BAW-FuE-Vorhaben dient primär der Vorbereitung dieses Antrags.

### **3 Untersuchungsmethoden**

Zur Durchführung der Experimente wurde am Institut für Wasserbau der Hochschule für Wirtschaft und Technik Karlsruhe mit Unterstützung des Ingenieurbüros Kauppert ein Versuchsstand aufgebaut. Die Versuche werden zum einen quasistationär durchgeführt, d.h. das Antriebsorgan ist ortsfest installiert und wird von vorne angeströmt. Die Strömungsgeschwindigkeit entspricht dabei der Schiffsge-  
schwindigkeit. Dies ist der für Schlagflächenantriebe optimale Betriebsfall, denn der erreichbare Schub nimmt, im Gegensatz zum Schiffspropeller, mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit zu. Beim Schiffspropeller ist es genau umgekehrt. Weiterhin werden Standversuche (Ruhewasser) durchge-

führt, um den Standschub zu ermitteln, der bei Schlagflächenantrieben i.d.R. schwächer ausgeprägt ist als bei üblichen Schiffspropellern. Schließlich wurden Versuche über einer beweglichen Sohle durchgeführt, um die Sohlbeanspruchung zu betrachten, siehe Bild 1.



**Bild 1:** *Standversuch bei folgenden Versuchsparametern: Max. Hubwinkel 40°, Phasenverschiebung = -75°, Max. Pitchwinkel = 40°, Periode = 1,5 s, Zeitschritte = 50, Wassertiefe im Becken = 0,29 m, Eintauchtiefe der Flosse = 0,22 m. Die Breite des Holzrahmens beträgt 45 cm. Die gemessene Schubkraft betrug 16,0 N, Splittkorndurchmesser ( $d_{50}$ ) ca. 1,4 cm, entsprechend ca. 0,22 m im Naturmaßstab.*

Der Schlagflächenantrieb besteht aus zwei Drehhebeln, die die Hub- (analog zum Schlagen einer Flosse) und Pitchbewegung (analog zur Drehung der Flosse während der Schlagbewegung) nachbilden, wobei die Schwingungsperiode  $T$ , die maximalen Hubbewegung ( $\Phi_{Hmax}$ ) und der Pitchwinkel ( $\Phi_{Pmax}$ ) sowie die Phasenverschiebung ( $\Psi$ ) zwischen Hub- und Pitchbewegung frei ansteuerbar sind. Am zweiten Hebel ist die Schlagfläche (Flosse) angebracht.

Die Flosse kann bis zu 0.3 m ins Wasser eintauchen. Dadurch kann das gesamte Spektrum denkbarer Streckungen der Schlagfläche variiert werden. Alle Drehkräfte und Drehgeschwindigkeiten sowie der Schub werden gemessen, sodass daraus der mechanische Wirkungsgrad als Verhältnis von Nutz- zu Gesamtleistung berechenbar wird. Die Messungen und Auswertungen werden im Rahmen von Hilfsassistententätigkeiten sowie Bachelor- und Studienarbeiten bei Prof. Eisenhauer durchgeführt.

### 3 Ergebnisse

Der Schwerpunkt der Modellversuche im Jahre 2015 lag auf der Durchführung von Standversuchen mit und ohne bewegliche Sohle. Dabei zeigte sich, dass die von der quasistationären Situation mit Anströmung bekannten hohen Schubbeiwerte auch im Stand erreichbar sind, wenn die Hub- und Pitchbewegung angepasst wird. Aber selbst bei nicht optimalem Bewegungsmuster für Anfahrvorgänge, wenn also das Bewegungsmuster der stationären Fahrt gewählt wird, wird noch ein passabler Anfahr Schub erreicht. Dieser würde, hochgerechnet auf die geometrischen Randbedingungen und üblichen Betriebsbedingungen eines GMS (Großmotorgüterschiff), wenn nur eine Flosse für den Antrieb gewählt wird, knapp mit einem konventionellen Schiffspropeller vergleichbar sein. Bei zwei Flossen ergäbe sich in etwa der Schub eines Einschraubers.

Eine erwartete geringere Sohlbeanspruchung gegenüber konventionellen Schraubenantrieben tritt jedoch nur bei einem Zwei-Flossen-Antrieb auf und war auch nicht signifikant. Wenn also derselbe

Schub mit einem Schlagflächenantrieb erzeugt werden soll wie mit einem herkömmlichen Propeller, sind die Sohlbeanspruchungen bei diesbezüglich relevanten Anfahrvorgängen nicht viel kleiner. Mit den in Kauppert et al. (2015) dokumentierten Experimenten wurden die wesentlichen Fragen, die zum Projektbeginn einer Antragstellung für ein weitergehendes F&E-Vorhabens bei einschlägigen Forschungsträgern im Wege standen, wie folgt beantwortet:

- Es konnte gezeigt werden, dass theoretisch hergeleitete und exemplarisch experimentell nachgewiesene hohe Schubbeiwerte und Wirkungsgrade (bis ca. 0,8) tatsächlich in der Praxis erreichbar sind.
- Dabei erwies sich das Bewegungsmuster des Schlagflächenantriebs als sehr robust hinsichtlich Schwankungen seiner wesentlichen Parameter (Pitchwinkel, Hubgeschwindigkeit/Anström-geschwindigkeit, Hubweg/Flossentiefe), was den Erfolg des Antriebssystems in der Natur erklärt und eine erfolgreiche technische Anwendung möglich erscheinen lässt.
- Sowohl in Fahrt als auch unter Anfahrbedingungen können mit Schlagflächenantrieben technisch akzeptable Schubkräfte erzeugt werden, die denen herkömmlicher Schraubenantriebe entsprechen, wobei das Bewegungsmuster jedoch für Anfahr-situationen angepasst werden sollte.
- Die Belastungen der Sohle aus Schlagflächenantrieben sind bei technisch relevanter Auslegung etwas geringer als aus Schraubenantrieben, wobei dies jedoch nur exemplarisch gezeigt wurde.

Ursprünglich vorgesehene Freifahrversuche erscheinen nach Bewertung aller vorliegenden Ergebnisse nicht mehr erforderlich zu sein. Deshalb wurde nach Abschluss des vorliegenden Berichtes (Kauppert et al, 2015) Kontakt mit dem Bionik-Labor der Hochschule für Wirtschaft und Technik, Karlsruhe aufgenommen, um die Themen eines weitergehenden Forschungsantrags zu konkretisieren. Aus verkehrswasserbaulicher Sicht erscheint ein Forschungsantrag wegen der unbefriedigenden Ergebnisse hinsichtlich der Sohlbeanspruchung und der erwarteten technischen Probleme bei der Umsetzung im Naturmaßstab nicht zwingend notwendig zu sein. Das Antriebssystem hat aber hohe Wirkungsgrade, so dass der Fokus möglicher Forschungsaktivitäten auf schiffbaulichen Fragestellungen liegen sollte. Diese könnten folgende Punkte betreffen:

- Hydromechanische Optimierung des Antriebssystems z.B. hinsichtlich Flossenform (Grundriss und Profil), Elastizität der Flosse (die nach Literaturrecherchen den Wirkungsgrad steigern soll, weil sie z.B. ungenaue Bewegungsmuster dämpft) und daraus folgende passive Flossenbewegung sowie Bewegungsmuster für verschiedene Verhältnisse von Hub- zu Anströmgeschwindigkeit - je nach Einsatzspektrum.
- Elektromechanische Optimierung des Antriebs- und Steuerungssystems mit den Zielen möglichst exakter Flossensteuerung bei gleichzeitiger Minimierung der Masse sowie Energierückgewinnung bei passiver Flossenbewegung.
- Optimierung der Flossensteuerung für alle relevanten Fahrsituationen wie Voraussfahrt, Kurvenfahrt sowie Manöver wie Stoppen in Abhängigkeit von der via Sensoren erfassten Bewegung des Schiffes im Abgleich von Soll- und Ist-Bewegungen.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016: Die Untersuchungen werden im Arbeitsjahr 2016 mit Abfassung eines Berichtes abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

#### **5 Literatur**

Neil Bose (2009): Marine Powering Prediction and Propulsors. Society of Naval Architects.  
Iosilevskii, G., Weihsdoi, D.(2008): Speed limits on swimming of fishes and cetaceans. J. R. Soc. Interface Vol 5.

Anderson, J. M., Streitlien, K., Barrett, D. S., Triantafyllou, M. S. (1998). Oscillating foils of high propulsive efficiency. J. Fluid Mech., Vol 360.

## **6 Veröffentlichungen**

Weiler, C. (2012): Der Schwanzflossenantrieb als alternativer Antrieb von Booten. Bachelor-Thesis, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft.

Kauppert, K., Schanz, C., Zlatanov, M., Söhngen, B. (2015): Abschlussbericht zum Auftrag Schlagflächenantriebe - Effizienz und Sohlbeanspruchung. Ing.-Büro Kauppert mit Unterstützung der BAW. 09.12.2015.

## **Modellierung des „human-factor“ bei der Fahrrinnenbemessung**

**Netzplan-Nr.:** A39530470006

**Projektleiter:** M. Paprocki (später B. Söhngen), Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)

**E-Mail:** michael.paprocki@baw.de, bernhard.soehngen@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Zeichnet man Schiffspfade auf, stellt man fest, dass die Schiffe mehr oder weniger um eine mittlere Kurs-achse pendeln. Dies liegt daran, dass die Fahrt eines Binnenschiffes im Grundsatz instabil ist, wobei der Pendelausschlag umso größer ist, je mehr Platz die Schiffsführer für Manöver zur Verfügung haben, je schlechter sie sich orientieren können und je unaufmerksamer sie fahren bzw. aufgrund der Verkehrssituation fahren können. Diese Pendelausschläge sind somit ein „human-factor“, die bei der Fahrrinnenbemessung zu beachten sind, wobei es auch physikalische Ursachen gibt wie die Turbulenz in einem Fließgewässer, Ansaug- und Abstoßvorgänge zum Ufer oder das Instabile Moment eines Schiffes, und auf die der Schiffsführer mehr oder wenig gut und schnell reagiert (aus VBW 2013). Um Befahrbarkeitsanalysen mit weitgehend empirischen Verfahren, wie das derzeit zur Fahrrinnenbemessung am Rhein verwendete Modellverfahren EMP (Söhngen et al. 2011, Söhngen & Paprocki 2013, Söhngen et al. 2014), das auf der Analyse und Extrapolation von Naturdaten beruht oder fahrdynamische Simulationsverfahren wie PeTra2D oder FARAO (Söhngen et al., 2015 oder Linke et al. 2015), bei denen das Schiff nicht durch einen Schiffsführer gesteuert wird wie bei Simulatoren mit Binnenschiffsbrücke, anwenden zu können, muss der „human-factor“-Anteil am Verkehrsflächenbedarf quantifiziert und für anzustrebende Leichtigkeits- und Sicherheitsstandards bemessen werden können. Diesem Ziel dient das F&E-Vorhaben.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit sowie zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Verkehrsträgers Wasserstraße ist die realistische Einschätzung des Verkehrsflächenbedarfs aus "human factor" erforderlich.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel des FuE-Vorhabens ist die Analyse bestehender Auswertungen der BAW mit dem Verfahren CFAA sowie die Interpretation von Modellversuchen am US Army Corps of Engineers (ERDC-Bericht HL-82-25, 1982) zur Schlingelfahrtbreite (durch Abspaltung des Kurvenfahreinflusses und der Schiffsbreite) im Hinblick auf die Überprüfung relevanter Einflussparameter und die Ableitung einer möglichst einfachen Formel zur Einschätzung dieser Zusatzbreite aus "human factor". Die zu entwickelnden Ansätze sollen zudem eine Wahrscheinlichkeitsaussage zur Überschreitung eines bestimmten, auf „human-factor“-Einflüsse zurückgehenden (also überwiegend nicht-deterministischen) Verkehrsflächenbedarfs, erlauben. Darauf aufbauend soll eine Zuordnung zu Leichtigkeits- und Sicherheitsstandards, wie sie von der PIANC WG 141 vorgeschlagen werden, erfolgen. Die entstehenden Ansätze sollen u.a. in die o.g. Verfahren EMP und PeTra2D/FARAO einfließen sowie in dem in der Entwicklung befindlichen Verkehrssimulationsmodell für den Rhein genutzt werden (Fischer et al. 2014).

### **2 Untersuchungsmethoden**

Das Programm CFAA erlaubt eine spektralanalytische Interpretation von Quer- und Drehbeschleunigungen im Hinblick auf nicht-deterministische Fahrrinnenbemessungsanteile. Die für eine Vielzahl von Schiffen auf Rhein und Neckar mit CFAA ermittelten Schlingelfahrtbreiten werden einer weiterführenden Analyse unterzogen, um mögliche deterministische Abhängigkeiten, wie sie sich aus der Analyse der ERDC-Daten (1982) ergaben, zu extrahieren. Dabei wurden u.a. Aspekte wie Brückendurchfahrt, Kurvenfahrt, breites oder enges Fahrwasser, Fahrt im Bereich von Querströmungen, beladenes oder leeres/ballastiertes Schiff, Verkehrssituation wie Einzelfahrt oder Begegnung, Schiffsgeschwindigkeit,

Fahrtrichtung, Fahrzeugabmessungen, Fahrzeugtyp etc. betrachtet und auf mögliche signifikante Einflüsse im Vergleich zu den Zusatzbreiten beim v.g. ERDC-Bericht untersucht. Der Bericht dokumentiert neben dem Einfluss des Zentriwinkels bei der Kurvenfahrt vor allem eine signifikante Abhängigkeit der Zusatzbreiten von der Fahrzeuglänge, dem Verhältnis der Schiffsgeschwindigkeit über Grund zu der relativ zum Wasser sowie von der Strömungsgeschwindigkeit. Dabei zeigte sich, dass nur wenige Einflussgrößen augenscheinlich signifikante Unterschiede erzeugen, wobei stringente statistische Signifikanztests wegen der extrem starken Streuung der Daten nicht möglich waren. Deshalb wurde ein heuristischer Weg eingeschlagen, indem versucht wurde, die Zusatzbreiten mit physikalisch begründeten charakteristischen Längen zu verknüpfen.

Hierzu gehört das Produkt der Schiffsgeschwindigkeit über Grund mit einer charakteristischen Zeit, die als Reaktionszeit interpretiert werden kann und aus der eine seitliche Abdrift resultiert, wenn zusätzlich angenommen wird, dass eine bestimmte Kurswinkelabweichung (Orientierungsgrenze) angenommen wird. Aus einer ggf. beschränkten Orientierung resultiert auch eine Abhängigkeit der charakteristischen Länge von der Schiffslänge und der Schiffsbreite, wenn eine vom jeweiligen Schiffsführer und dessen Aufmerksamkeit abhängige temporäre Schrägstellung zum Schiffskurs oder eine fehlerhafte Einschätzung des Abstandes z.B. vom Ufer als "human factor" angenommen wird. Schließlich erwies sich die Zusatzbreite bei der Kurvenfahrt, unter Beachtung des Zentriwinkels, als skalierend für die Schlangelfahrtbreite, offenbar weil bei einem stark driftenden Schiff und bei lang gezogenen Kurven die Orientierung im Fahrwasser erschwert wird. Neben diesen charakteristischen Längen stellte sich der Schiffstyp als relevant heraus. So waren die Zusatzbreiten von Tankmotorschiffen oder Containerschiffen signifikant größer als die von Massengutschiffen. Dies liegt u.a. an der Bauart dieser Schiffe mit unterschiedlich starken Instabilen Momenten.

Mit der Basisannahme, dass die Schlangelfahrtbreiten proportional zu einer geeigneten Linearkombination der v.g. charakteristischen Längen und einem "Schiffstyp-Faktor" sind, wurden beobachtete Zusatzbreiten auf eine Referenz-Fahrsituation umgerechnet, wobei die Kanalfahrt gemäß deutschen Ausbaugrundsätzen mit 2,8 m tief abgeladenen einspurig-zweigliedrigen Schubverbänden gewählt wurde. Zur Umrechnung der Modellversuche am ERDC wurde zusätzlich angenommen, dass die Reaktionszeit entsprechend dem Froudeschen Zeitmaßstab bei Umrechnung auf Naturgröße vergrößert ist und dass die Modellschiffe wie z.B. Tankschiffe ein vergrößertes instabiles Moment aufweisen, denn die Leichter der modellierten US-Schubverbände haben eine füllige Bugform, die das instabile Moment begünstigt.

Die so auf die Referenzsituation umgerechneten Zusatzbreiten aller beobachteten Natur- und Modellfahrten wurden nun statistisch analysiert. U.a. wurden sie als Wahrscheinlichkeitsverteilung aufgetragen, siehe Bild 1. Es zeigt, dass die HL-82-25-Daten nun recht gut mit den Naturdaten aus CFAA-Auswertungen übereinstimmen. Die extrem großen Unterschiede der Originaldaten werden dadurch überwunden und gleichzeitig erklärbar. Diese auf die Referenzsituation umgerechneten Messdaten können nicht nur wegen der geringen Unterschiede zwischen Natur- und Modelldaten als weitgehend universell angesehen werden, sondern vor allem deshalb, weil sich in den Häufigkeitsverteilungen der nach verschiedenen Einflussgrößen, z.B. der Schiffsgeschwindigkeit, klassierten Messdaten, keine signifikanten Unterschiede ergaben.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung erlaubt eine Interpretation der in deutschen Richtlinien angegebenen Zusatzbreiten. Der für Begegnungsprofile angegebene Wert von 4,1 m hat danach eine rechnerische Überschreitungswahrscheinlichkeit von 18%. Wenn statt des SV (Schubverbandes) ein GMS (Großmotorgüterschiff) als Referenzschiff verwendet wird, ergibt sich eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 8%. Diese Werte passen recht gut zu der rechnerischen Kollisionswahrscheinlichkeit, die aus Naturversuchen am MDK (Main-Donau-Kanal) abgeleitet wurde. Auch die in den deutschen Richtlinien für Richtungsverkehr angegebene Zusatzbreite von 7,0 m wird indirekt bestätigt, da die zugehörige Überschreitungswahrscheinlichkeit bei nur 1% für den SV und 3% für das GMS als Referenzschiff beträgt. Dies sind sehr geringe Werte, die einer nahezu ungestörten Fahrt über lange Strecken zuzuordnen sind. Diejenige Zusatzbreite, die rechnerisch gleich häufig über- wie unterschritten wird ist dagegen viel kleiner und liegt im Bereich von 2,0 m. Dies bedeutet, dass bei konzentrierter Fahrt noch Reserven bestehen, die z.B. zur Vermeidung einer Kollision genutzt werden können.

Es sei zum Vergleich mit der im ersten FuE-Bericht genannten Untersuchungsmethodik angemerkt, dass das Vorhaben in der Anfangsphase des Projektes vor allem auf die Modellierung des "human factor" in fast-time-Simulationsverfahren wie PeTra2D/FARAO zugeschnitten war. Das Ausscheiden des Projektleiters Michael Paprocki zwang zu einer Umorientierung und Straffung des Projektes. Deshalb wurde auf empirische Ansätze zur Entwicklung einer Bemessungsformel für Zusatzbreiten aus dem "human factor" fokussiert. Die Facharbeit wurde überwiegend vom Ing.-Büro Schmid in Kapsweyer, das auch die meisten CFAA-Auswertungen durchgeführt hatte, vorgenommen (Niesler, 2015).

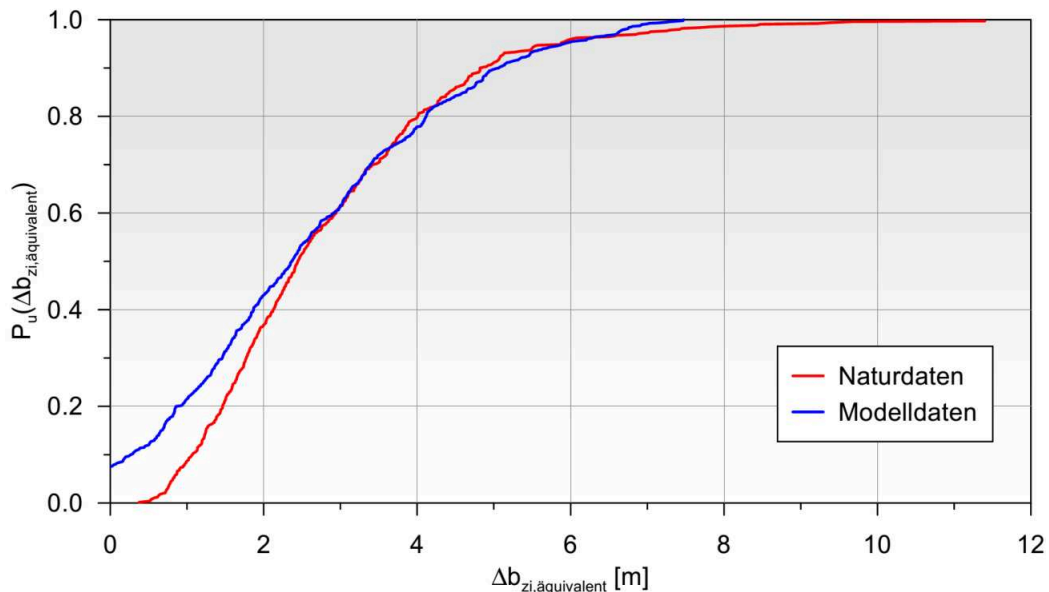


Bild 1: Wahrscheinlichkeitsverteilung der auf die Referenzsituation (SV in Kanalfahrt) umgerechneten Schlingelfahrtbreiten aller Daten aus Natur- und Modellversuchen

### 3 Ergebnisse

Die ermittelte "human-factor-Funktion" zur Umrechnung einer beobachteten Zusatzbreite  $\Delta b_{zi}$  auf einen entsprechenden Referenzzustand  $\Delta b_{zi,\text{äquivalent}}$  ist mit Glgn (1) bis (4) und Tabelle 1 angegeben.

$$\Delta b_{zi,\text{äquivalent}} = \Delta b_{zi} \frac{l_{ci,\text{ref}}}{l_{ci}} \quad (1)$$

mit

$$l_{ci} = 0,04 f_{\text{Schiff}} \left[ B_S + 0,2 L_S + t_R v_{SüG} + 2 \Delta b_K f_{\Theta} \right] \quad (2)$$

$$\Delta b_K = \frac{1}{2} \frac{(c_f l_S)^2}{R} \quad (3)$$

$$f_{\Theta} = \tanh \left( \frac{1}{2} \frac{\Theta}{20^\circ} \right) \quad (4)$$

	Massengutschiff	Flüssigutschiff	Container
$f_{\text{Schiff}}$	1,0	1,2	1,3

Tabelle 1: Schiffsfaktor  $f_{\text{Schiff}}$



Darin bezeichnen  $l_{ci}$  die charakteristische Länge des Messwertes,  $l_{ci,ref}$  den entsprechenden Wert des Referenzfalls (Kanal),  $f_{Schiff}$  den Schiffsfaktor (Werte oben angegeben),  $B_S$  die Schiffsbreite,  $L_S$  ( $l_S$ ) die Schiffslänge,  $t_R$  die Reaktionszeit (6 s bei Naturdaten),  $v_{StG}$  die Schiffsgeschwindigkeit über Grund,  $\Delta b_K$  die Zusatzbreite in der Kurvenfahrt,  $f_\Theta$  einen Faktor zur Berücksichtigung des Kurven-Zentriwinkels  $\Theta$ ,  $c_f$  die relative Lage des taktischen Drehpunktes (Berechnungen siehe Niesler, 2015) und  $R$  den Kurvenradius.

Die Wahrscheinlichkeitsfunktionen für Referenz-Fahrsituationen, die durch Pearson-III-Verteilungen angenähert wurden, können nun genutzt werden, um bei gewählten Überschreitungswahrscheinlichkeiten, z.B. gemäß deutschen Kanalrichtlinien, Zusatzbreiten für andere Randbedingungen zu schätzen. Dadurch kann der Leichtigkeitsstandard z.B. der Richtungskanalprofile auf Fahrsituationen am Rhein übertragen werden. Allgemein kann für einen gewählten Leichtigkeitsstandard, der mit der Überschreitungswahrscheinlichkeit korrespondiert, ein Einzelwert für beliebige Randbedingungen errechnet werden, wenn die Transformationsfunktion ("human-factor-Formel") umgekehrt genutzt wird.

Beispielsweise ergibt sich aus den v.g. 4,1 m Zusatzbreite für Begegnungen in deutschen Kanälen für ein 135m-Schiff am Neckar bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 m/s, einem engen Kurvenradius von 300 m und 50° Zentriwinkel ein Wert von rund 10,0 m. Unter ungünstigen Randbedingungen mit Strömung und vor allem in der Kurvenfahrt nehmen die Zusatzbreiten aus Instabilitäten erheblich zu.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016: Anfertigung des Abschlussberichtes und Implementierung der Formeln in das Programm EMP und ins Verkehrssimulationsverfahren.

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2016.

#### 5 Literatur

- ERDC (1982): Channel widths in bends and straight reaches between bends for push towing. Technical Report HL-82-25; Hydraulic Laboratory, U.S. Army Engineer Waterway Experiment Station; Vicksburg, Mississippi, Oktober 1982.
- Fischer, N., Treiber M., Söhngen B. 2014. Modelling and Simulating Traffic Flow on Inland Waterways, PIANC Congress, San Francisco
- Linke, T., Rauscher, D., Söhngen, B. 2015. Recent developments in the application of shallow water ship hydrodynamics in inland waterway design, Smart Rivers Conference 2015, Buenos Aires
- Niesler (2015): Bericht zu den Untersuchungen zu Instabilitäten eines Binnenschiffes", Bericht Ing.-Büro Schmid, Kapsweyer, September 2015
- Paprocki, M. (2010): Statistische Modellierung und Analyse räumlicher Daten. Diplomarbeit. Universität Potsdam. Potsdam.
- Söhngen, B. 2015: Workshop Design Guidelines for Inland Waterways, Application of WG 141 approach including elaboration of field data and fast time simulation for Class Va-vessel passing narrow Jagstfeld bridge in the German Neckar River, Smart Rivers Conference 2015, Buenos Aires
- VBW 2013. Fahrdynamik von Binnenschiffen, Fachausschuss Binnenwasserstraßen und Häfen (VBW/HTG) und Fachausschuss für Binnenschiffe (VBW/STG), Germany

#### 6 Veröffentlichungen

- Söhngen, B., Qaunda, R. (2011). Untersuchungen zur Befahrbarkeit des Neckar mit 135 m langen Schiffen in der Streckenfahrt, Wasserwirtschaft, Heft 6
- Söhngen B. und Paprocki, M. (2013): Mindestbreiten der Fahrrinnen für eine sichere und leichte Schifffahrt. KLIWAS Teilprojekt 4.4. Koblenz.
- Söhngen B., Feierfeil T., Paprocki, M. (2014): Semiempirische Untersuchungen zur Mindestbreite der Fahrrinne am Rhein. Duisburg.

## **Numerische Modellierung von Transportkörpern (Dünen) in Binnenwasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39530570001

**Projektleiterin:** A. Goll, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

**E-Mail:** annalena.goll@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Form des Gewässerbodens bestimmt nicht nur den hydraulischen Widerstand, Sedimenttransport, Morphodynamik und die Habitatentwicklung. Sie stellt die Schifffahrt mitunter vor große Probleme: Obwohl sowohl Sedimentcharakteristiken, Flussgeometrie und Abfluss bekannt sind, lässt sich der zu erwartende Sedimenttransport und damit die Wassertiefe nur ungenau bestimmen. Die Entwicklung von Transportkörpern wie Dünen und Bänken trägt hierbei eine nicht unerhebliche Teilschuld. Die Wassertiefen der Schifffahrtsstraßen genau zu prognostizieren bzw. zu beeinflussen ist also unverzichtbar. Dies ist einer der Gründe, warum in der Literatur Dünen als wichtigste Sohlform in der praktischen Ingenieurstätigkeit bezeichnet werden.

Zumeist wird in der numerischen Modellierung mittels geschätzter oder gemessener Dünenlänge und -höhe eine angepasste Sohlrauheit berechnet, welche den Einfluss der Transportkörper auf die Strömung abbilden soll. Die Sohlrauheit kann z.B. kumulativ aus der Kornrauheit und der Formrauheit von Riffeln und Dünen berechnet werden. Damit wird eine globale Anpassung der Sohlrauheit vorgenommen. Der sich zeitlich und örtlich ändernden Geometrie der Dünen wird damit gar nicht oder nur ungenügend Rechnung getragen.

Verschiedene jüngere Publikationen berichten von der expliziten Modellierung von Dünen, z.B. Rüther et al. (2008) und Nabi (2010). Dabei kommen dreidimensionale RANS-Modelle oder auch LES-Modelle zum Einsatz. In verschiedenen Publikationen (Goll, Kopmann, 2012, Goll et al., 2013a+b) konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell mit dem in der BAW eingesetzten dreidimensionalen Feststofftransportmodell (FT-Modell) Telemac / Sisyphe möglich ist, die Dünenentstehung und ihre Propagation zu simulieren.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine wesentliche Aufgabe der Abteilung ist die möglichst genaue Berechnung und Vorhersage der morphologischen Entwicklungen infolge von Bau-, Regelungs-, Instandhaltungs- und Geschiebemanagementmaßnahmen an Bundeswasserstraßen für die Beratung der planenden und ausführenden Instanzen der WSV. Eine kontinuierliche Verbesserung der in der BAW eingesetzten Modelle führt zu einer steten Optimierung und einem erweiterten Anwendungsspektrum der Modelle für die Projektarbeit. Langfristig sollen mit Hilfe von numerischen Modellen Dünenänderungen infolge von baulichen oder geschiebemanagementlichen Änderungen an den Wasserstraßen prognostiziert werden können. Diese Ergebnisse sind entscheidend für eine möglichst genaue Prognose und Beeinflussung der Wassertiefen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die Möglichkeiten der numerischen Modellierung von Transportkörpern / Dünen mittels FT-Modell zu untersuchen. Ausgehend von der These, dass Dünen mit numerischen dreidimensionalen Verfahren direkt (also nicht mit Hilfe von Parametrisierungen) simuliert werden können, sollen die Möglichkeiten und Grenzen zur Dünenprognose mit Hilfe dieser Verfahren abgesteckt werden. Die Validierung der Ergebnisse soll an Messergebnissen aus in der BAW laufenden Rinnenversuchen mit Dünen erfolgen. Die Anwendung der Dünenprognose soll dann an realen Flussmodellen geprüft und ggf. auf die Projektarbeit übertragen werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Da die Physik der Dünen noch nicht vollständig verstanden ist, sind vergleichende Untersuchungen im Labor unabdingbar. In einer Laborrinne („blaue Rinne“) der BAW finden Untersuchungsreihen zu Dünen statt. Dabei handelt es sich um Versuche mit bewegter Sohle und verschiedenen Einbauten, und um rein hydraulische Messungen über natürlich geformten, fixierten, unbeweglichen Dünen. Numerisch begleitet können durch diese Experimente sowohl hydrodynamische als auch morphodynamische Modelle validiert werden.

Für die explizite Modellierung von Dünen mittels FT-Modell müssen zunächst die Parameter detektiert werden die Dünenentstehung, Dünenhöhe und Dünenlänge bestimmen. Die Wirkung dieser Parameter muss systematisch untersucht und verstanden werden. Ggf. sind weitere Ansätze zu implementieren und zu testen (z.B. gravitationeller Transport, Turbulenzmodellierung, nicht-hydrostatischer Druckansatz). Da Dünen eine sehr komplexe Hydrodynamik erzeugen, spielen die Auflösung des Gitternetzes sowohl horizontal als auch vertikal, sowie die Turbulenz eine große Rolle. Diesem Umstand sind durch die Wahl von verschiedenen Turbulenzmodellen sowie durch unterschiedliche räumliche und zeitliche Auflösungen bis hin zu LES-Simulationen Rechnung zu tragen. Die Messungen über der fixierten Dünensohle bieten hier eine sehr gute Datengrundlage zur Validierung.

Zum Einsatz kommt das Verfahren Telemac / Sisyphe der EDF (Software), da diese Open-Source-Software eine exzellentes Morphodynamik-Modul beinhaltet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen in einem projektrelevanten Anwendungsfall eingesetzt werden. Wenn möglich, soll dabei eine direkte Dünenmodellierung durchgeführt werden. Andernfalls sind Parametrisierungen abzuleiten, die eine verbesserte Berücksichtigung von Dünen ermöglichen.

## 3 Ergebnisse

Bis Mitte 2015 wurden die Arbeiten in dem FuE-Projekt mit der Anwendung der numerischen Dünenmodellierung auf einen Flussabschnitt an der Elbe abgeschlossen. Die Dünenbewegung in einem 4 km langen, geraden Flussabschnitt bei Dömitz (El-km 474,6 – 505,8) wurde mit Telemac3D und Sisyphe modelliert. Das horizontale unstrukturierte Dreiecksgitter besteht aus etwa 170000 Knoten, was bei 10 vertikalen Schichten zu etwa 1,7 Millionen Knoten im 3D-Gitter führt. Mit 80 Prozessoren wurden für 5,25 Tage (126 h) Simulationszeit gut 7 Tage Rechenzeit auf dem Hochleistungsrechner der BAW benötigt.

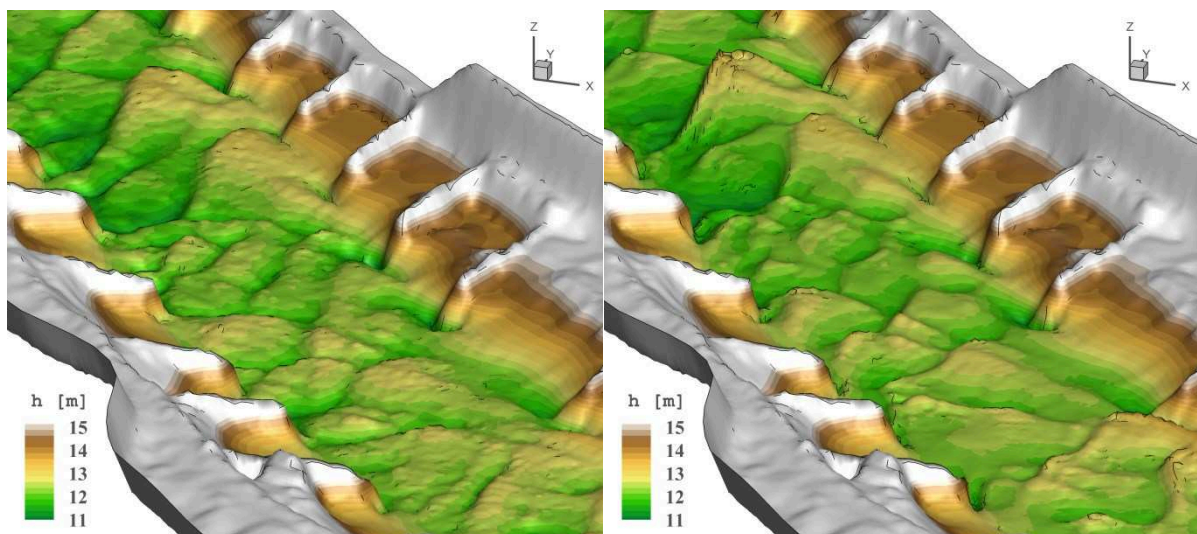


Bild 1: *Dreidimensionale 1:10 überhöhte Darstellung der Dünen im Ausgangszustand (links) und nach 126 h numerischer Simulation (rechts).*

Bild 1 zeigt den Anfangszustand aus dem Geländemodell und das Ergebnis der numerischen Simulation mit stationärem Abfluss nach 126 Stunden. Man kann erkennen, dass die Dünen sich nicht abflachen, sondern weiterhin ihre typischen Formen behalten. Dies zeigt auch der Vergleich der statistischen Dünenparameter zwischen Messung und Rechnung. In Tabelle 1 sind die Standardabweichung, als Maß für die Dünenhöhe, die Kurtosis als Maß für die Verteilung der Dünen in der Fläche (Dreidimensionalität) und die Skewness als Maß für die Form (Wölbung) der Dünen gegenübergestellt. Die simulierte Standardabweichung und die Kurtosis passen sehr gut zu den Messungen. Die simulierte Skewness liegt in der Simulation etwas zu hoch. Insgesamt kann die dreidimensionale Dünensimulation als erfolgreich angesehen werden. Mit der zu erwartenden steigenden Rechenleistungen der Computer werden in Zukunft auch längere Simulationszeiträume möglich werden. Dadurch könnten dann die Einflüsse von sich ändernden Abflüssen oder von Bauwerksmaßnahmen auf die Dünenformen prognostiziert werden.

	Standardabweichung [m]	Skewness [-]	Kurtosis [-]
Messung	0,29	0,179	2,922
Rechnung min. / max. Wert wäh- rend 126 h Simu- lationszeit	0,286 – 0,29	0,195 – 0,246	2,904 – 2,950

*Tabelle 1: Vergleich der statistischen Dünenparameter aus der Naturmessung und der dreidimensionalen Simulation*

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- Abschlussbericht und Fertigstellung der Promotionsarbeit

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

#### 5 Literatur

- Apsley, D. D., Stansby, P. K. (2008): Bed-load sediment transport on large slopes: Model formulation and implementation within a RANS solver. *Journal of Hydraulic Engineering*, Heft 134, S. 1440-1451.
- Nabi, M. (2010): Computational modelling of three dimensional bedform evolution. *Proceedings of River Flow 2010*, TU Braunschweig.
- Ruether, N., Olsen, N., Eilertsen, R. (2008): 3D modeling of flow and sediment transport over natural dunes. *Proceedings of 4th International Conference on Fluvial Hydraulics*, River Flow 2008, Cesme/ Izmir, Turkey.
- Yang, S.-Q., Lim, S.-Y. (2003): Total load transport formula for flow in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, Heft 129, S. 68-72.

#### 6 Veröffentlichungen

- Goll, A., Kopmann, R., Brudy-Zippelius, T. (2011). Numerical modelling of bed forms (dunes) with Telemac-3D and Sisyphe. *Proceedings of the 18th Telemac and Mascaret User Conference*, 19–21 October 2011. EDF Corporate University, Paris, 2011, pp. 16–21.
- Goll, A., Kopmann, R. (2012). Numerical simulations of groyne influenced dunes. *Proceedings of River Flow 2012*. Costa Rica, 2012.
- Goll, A., Kopmann, R. (2012). Dune simulation with Telemac-3D and Sisyphe: A parameter study. *Proceedings of the 19th Telemac and Mascaret User Conference*, 17–19 October 2012. Oxford, 2012.
- Goll, A., Kopmann, R., Villaret, C. (2013). Numerical modelling of flumes with moving dunes – Telemac3D and Sisyphe. *Proceedings of 4th International Conference on Marine and River Dune Dynamics (MARID)*. Bruges, Belgium, 2013, VLIZ Special Publication.
- Goll, A., Kopmann, R., Baron, M. (2013). Kontinuierliche Validierung hydrodynamischer und morphodynamischer Modelle mit physikalischen Modellversuchen. *Wasserwirtschaft*, 2013 (12).

- Goll, A., (2014). Direct Simulation of Bed Forms of the River Elbe, Germany. Proceedings of the 21th Telemac-Mascaret User Conference, 15-17 October 2014, Grenoble.
- Goll, A., (2014) Numerische Simulation von Dünen. Kolloquium Herausforderung Sedimenttransport – Methoden und Konzepte im Flussbau, 26. November 2014, BAW, Karlsruhe.

## **Evaluierung und Adaptierung der SPH-Methode für wasserbauliche Fragestellungen an Bundeswasserstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39530570002

**Projektleiter:** J. A. Jankowski, E. Rustico, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

**E-Mail:** jacek.jankowski@baw.de, eugenio.rustico@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die in den Abteilungen W und K derzeit sowohl in ingenieurpraktischen, als auch Forschungsprojekten verwendeten numerischen Verfahren für die Strömungssimulation sind ausschließlich netzbasiert. In diesen konventionellen Verfahren, die üblicherweise mit den Finite-Elementen-, -Differenzen- und -Volumen-Methoden (FEM, FDM, FVM) aufgebaut sind, wird abgesehen von der teilweise in der Advektion verwendeten Lagrange'schen Methode der Charakteristiken ausnahmslos die Euler'sche Betrachtung des zu modellierenden Fluids angenommen.

Obwohl äußerst erfolgreich, haben diese netzbasierten Verfahren gewisse Anwendbarkeitsgrenzen, an die man sich nur ausnahmsweise und oft mit klaren Verlusten an der rechnerischen Effizienz nähern kann. Hiermit sind Strömungen gemeint, die charakterisiert sind durch größere geometrische Deformationen bzw. stärkere Schubspannungen an Kontaktflächen zwischen der sich in Bewegung befindenden physikalischen Phasen (wie Wasser, Luft, Feststoffe), bzw. diesen Phasen und beweglichen Objekten, oder durch eine stärkere, sich dynamisch verändernde Vermischung. Dazu zählen verschiedene Strömungsprozesse, die relevant für wasserbauliche Fragestellungen sind (Kapitel 1.2).

SPH, *Smoothed Particle Hydrodynamics*, ist eine alternative Methode zur Modellierung dieser o. g. Strömungen, die mit konventionellen – netzbasierten – numerischen Methoden schwer zu erfassen sind. Sie basiert auf der konsequent angewendeten Lagrange'schen Form der Betrachtung der Gleichungen der Strömungsmechanik (Violeau 2012). Im Gegensatz zu Netzmethode werden die physikalischen Eigenschaften des Fluids Partikeln und nicht fixierten Punkten im Raum zugeordnet. Es wird kein Netz benötigt, um diese Eigenschaften zu interpolieren bzw. Operatoren der Gleichungen zu formulieren: Das Fluid wird durch eine endliche Anzahl makro- oder mesoskopischer (im Sinne der Mechanik des Kontinuums) Objekte abgebildet. Diese Objekte haben eine konstante Masse und ein gegebenes Volumen, das genügend klein ist, um annähernd als miteinander wechselwirkende Fluidpartikel betrachtet zu werden. Die Genauigkeit des Verfahrens hängt dann wesentlich von Partikeldichte also der Partikelanzahl ab.

Obwohl die mathematische Theorie komplex und die Begriffe abstrakt sind, zeichnen sich die resultierenden numerischen Codes durch elegante Geradlinigkeit aus. Der rechnerische Aufwand in SPH-Codes wird durch die Komplexität der Kernelfunktionen, den Suchalgorithmus für die Nachbarpartikel und die Begrenzung der Zeitschrittlänge bestimmt. Insbesondere diese letzte Limitierung ist für die SPH-Methode besonders kritisch: Um die Inkompressibilität der Strömung korrekt wiederzugeben, muss zur Einhaltung von Stabilitätskriterien die Zeitschrittlänge umgekehrt proportional zu der (sehr großen) Schallgeschwindigkeit im gegebenen Fluid sein, was theoretisch zu sehr kleinen Zeitschritten zwingt. Dies kann als größter Nachteil des SPH-Verfahrens für die Anwendung mit längeren Zeitskalen der zu reproduzierenden Prozesse aufgefasst werden. Wegen der algorithmischen Geradlinigkeit und der resultierenden einfachen Datenstrukturen ist diese Methode jedoch für massive Parallelisierung besonders geeignet. In den letzten Jahren erlaubt die Verfügbarkeit preisgünstiger paralleler Hardware sowohl die Überwindung des rechnerischen Aufwands aufgrund der Limitierung durch die Zeitschrittweite, als auch die Steigerung der Qualität der Simulation durch Verwendung von größeren Partikelzahlen (Rustico 2012).

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Bei Steigerung der rechnerischen Effizienz eröffnet die SPH-Methode (Smoothed Particle Hydrodynamics) neue Möglichkeiten bei der Bearbeitung von wasserbaulichen Fragestellungen, bei denen

die traditionellen netzbasierten Methoden an ihre Anwendbarkeitsgrenzen stoßen. Insbesondere Strömungen mit folgenden Eigenschaften sind von Interesse: größere Deformationen der freien Oberfläche (z. B. brechende Wellen und deren Einfluss auf wasserbauliche Strukturen), Übergänge zwischen schießenden und strömenden Strömungszuständen (Wehre, überflutete Dämme und Bühnen), Kräfte auf schwimmende Objekte (Schleusungsvorgang), turbulente Strömungen bei komplizierten Geometrien (Fischpässe), Bodenfracht, Erosion (Kolkung), bewegliche Bodenformen, suspendierte Sedimente und deren Aufwirbelung, Multiphasen-Strömungen (Eisgang) etc.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen des Projektes soll ein existierender SPH-Code (GPUSPH) (Hérault et al. 2010, 2011) für die Berechnungen mit neuen Rechnerarchitekturen (GPU-Nutzung) weiter optimiert werden, so dass eine Evaluierung und Adaptierung der SPH-Methode für die ausgewählten, spezifischen wasserbaulichen Probleme an den Wasserstraßen möglich ist. Als erste Testanwendungen werden Fischpässe, Wehre und Schleusen gewählt. Ggf. kommt eine Erweiterung hinsichtlich des Sedimenttransports in kleineren Zeitskalen in Betracht. Am Ende des Projekts soll ein neues Modellierungssystem zur Verfügung stehen, das man einerseits in der täglichen Projektarbeit anwenden und andererseits weiter im Hause entwickeln kann.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Die ausgewählten Anwendungen sollen die Anwendbarkeit der SPH-Methode und der entwickelten Software-Umgebung zur Bewältigung ingenieurpraktischer Probleme an Wasserstraßen demonstrieren. Hiermit sind Vergleiche mit den Resultaten von Laboruntersuchungen und numerischen Simulationen unter Mitwirkung der Referate W1, W3 und W4 notwendig.

Die ersten Entwicklungsarbeiten erfolgten zuerst auf einem mit einer für numerische Berechnungen geeigneten leistungsfähigen GPU-Karte ausgestatteten PC. Seit Mitte 2013 stehen 8 Knoten mit je zwei Nvidia Tesla K20M als Erweiterung des Compute-Servers der Abteilung W zur Verfügung, was Arbeiten an der Multi-GPU-Multi-Node Version des Codes erlaubt. Programmierarbeiten erfolgen weitgehend mit Open Source bzw. frei zur Verfügung stehenden (Nvidia CUDA) Entwicklungswerkzeugen. Es wird ein gemeinsames Code-Repository (git) für alle Konsortium-Mitglieder organisiert und verwaltet. Alle Entwicklungen bleiben Open Source unter der GPL-Lizenz.

Die Arbeiten erfolgen im Rahmen eines internationalen Konsortiums (ATHOS). Die Arbeit im Konsortium erfordert die Teilnahme an halbjährlichen Treffen, in denen die Richtung der weiteren Forschung bestimmt wird und die zu erledigenden Arbeiten samt der zur Verfügung stehenden Mitteln definiert werden. Es werden regelmäßige Arbeitstreffen organisiert. Die relevanten Ergebnisse der Arbeit werden publiziert, wobei der jährliche SPHERic Workshop als wichtigste Plattform für die Kommunikation bevorzugt wird.

## **3 Ergebnisse**

Die Arbeiten im Jahr 2015 konzentrierten sich auf die effiziente Adaptierung und Implementierung methodischer Ansätze, die gemeinsam im GPUSPH Konsortium ausgearbeitet wurden und deren spezifische Anwendung in wasserbaulichen Fragestellungen. Dies betraf vor allem die Implementierung von semianalytischen und dynamischen Randbedingungen und Einleitungen von (turbulenten) Strahlen, Handhabung von Rändern und der Wandreibung, die korrekte Definition der Anfangsbedingungen, diverse Methoden der Repräsentation von schwebenden Objekten und Auswertung von auf diese Objekte wirkenden Kräften. Diese meistens neuen und innovativen Methodenbausteine wurden in ihrer komplexen Wechselwirkung in einem anspruchsvollen und in der Anwendungsgeschichte der SPH-Methode ganz neuen Beispiel zur Schleusung eines Schiffes mit der realen Geometrie der Schleuse Kiel-Holtenau am Nord-Ostsee-Kanal getestet.

Es zeigten sich vor allem Schwierigkeiten bei der Handhabung des Modells und der Parametrisierung numerischer Ansätze. Gleichzeitig wurde die entscheidende Bedeutung einer effizienten GPU-Implementierung klar, um vertretbare Rechenzeiten zu erreichen. Die korrekte Wiedergabe der auf das zu schleusende Schiff wirkenden Kräfte ist weiterhin das zentrale Thema der laufenden Arbeiten.

Das Projekt wurde Mitte 2015 BAW-intern evaluiert und die Anwendbarkeit der GPUSPH Implementierung der SPH-Methode für spezifisch verkehrswasserbauliche Fragestellungen kritisch beurteilt. Begründung hierfür sind vor allem die derzeit nicht zufriedenstellenden Ergebnisse für den Testfall „Schleusung eines Schiffes“.

Die Zusammenarbeit im Rahmen des GPUSPH Konsortium wurde durch Teilnahme an Workshops und gemeinsame Veröffentlichungen, auch zu Themen außerhalb dieses Projektes, vertieft und bekräftigt.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Vorhaben wurde bis Ende 2016 verlängert. Das Hauptziel für den Zeitraum ist, dieses Projekt auf qualifizierte Weise zu beenden, wobei die erreichten Ergebnisse durch weitere Untersuchungen ergänzt werden sollen. Hiermit ergeben sich die folgenden Schwerpunkte für die Zeit der Verlängerung:

- Konzentration auf das Validierungsbeispiel „Schleusung eines Schiffes“. Bei den eingesetzten SPH-Ansätzen soll die bisher entwickelte Methodik verfeinert werden. Es soll nicht auf aktuelle bzw. zukünftige Zuarbeit anderer Mitglieder des GPUSPH-Konsortiums gewartet werden. Das Ziel ist es, die numerischen Resultate für die auf ein Schiff beim Schleusungsprozess wirkenden Kräfte zu verbessern. Die Vorgehensweise soll eine systematische und methodische Untersuchung der Ursachen für Diskrepanzen zwischen der numerischen und der gegenständlichen Modellierung beinhalten.
- Die Zusammenarbeit mit dem GPUSPH-Konsortium soll sich auf die methodischen Aspekte des o. g. Validierungsbeispiels konzentrieren und sich eher auf Workshops und bilaterale Arbeitskontakte stützen.
- Veröffentlichung der bisher erreichten Ergebnisse mit der dazu gehörenden Diskussion (geplant ist die SPHERIC-Konferenz 2016 in München).
- Das Erreichen einer neuen Version des Codes, die geeignet wäre, auf der Webseite des GPUSPH-Konsortiums veröffentlicht zu werden zusammen mit einer möglichst präzisen Code-Dokumentation.
- FuE-Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2016.

#### 5 Literatur

- Violeau, D. (2012): Fluid Mechanics and the SPH Method: Theory and Applications, Oxford University Press, 640p.
- Hérault, A., Bilotta, G., Darlymple, R.A. (2010): SPH on GPU with CUDA. Journal of Hydraulic Research, 48:S1, 74-79.
- Hérault A, Bilotta G, Darlymple, R.A. (2011): GPUSPH Users Manual, August 1, 2011.
- Rustico, E. (2012): Fluid dynamics simulations on multi-GPU systems. PhD thesis, Università degli Studi di Catania, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali.
- Thorenz, C., Anke, J., (2013): Evaluation of ship forces for a through-the-gate filling system, Proceedings of the Smart Rivers Conference 2013.

#### 6 Veröffentlichungen

- Rustico, E., Bilotta, G., Hérault, A., Del Negro, C., Gallo, G. (2014): Advances in Multi-GPU Smoothed Particle Hydrodynamics applications. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 25(1) 43-52.
- Rustico, E., Brudy-Zippelius, T., Hérault, A., Bilotta, G. (2014): Modelling the Holtenau ship lock with SPH, 11th International Conference on Hydrosience & Engineering, 2014, Hamburg.
- Rustico, E., Jankowski, J., Hérault, A., Bilotta, G., Del Negro, C. (2014): Multi-GPU, multi-node SPH implementation with arbitrary domain decomposition, 9th SPHERIC International Workshop, 2014, Paris.
- Farahani, R.J., Darlymple, R.A., Hérault, A., Bilotta, G., Rustico, E. (2014): Modeling the Coherent Vortices in Breaking Waves, 9th SPHERIC International Workshop, 2014, Paris.



- Rustico, E., Sokoray-Varga, B., Bilotta, G., Hérault, A., Brudy-Zippelius, T. (2014): Full 3D numerical simulation and validation of a fish pass with GPUSPH, ECMI 2014 - The 18th European Conference on Mathematics for Industry, 2014, Taormina, Italy.
- Dalrymple, R.A., Farahani, R.J., Hérault, A., Bilotta, G., Rustico E. (2015): Modelling water waves with GPUSPH, IAHR Hydrolink, 2015(3) (Themed Issue on SPH in Hydraulics), 85-86.
- Wei, Z., Dalrymple, R.A., Hérault, A., Bilotta, G., Rustico, E., Yeh, H. (2015): SPH modeling of dynamic impact of tsunami bore on bridge piers. Coastal Engineering, 104, 26-42.

## **Zukunftskonzept WADABA**

**Netzplan-Nr.:** A39540070004

**Projektleiter:** P. Weinmann, Abteilung Zentraler Service

**E-Mail:** peter.weinmann@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Wasserstraßendatenbank (WADABA) stellt ein zentrales IT-Verfahren im Infrastrukturdaten-Management der WSV dar. Technologisch ist die WADABA auf einem Stand von vor ca. 10 Jahren. Die zugrunde liegende Systematik der Objektidentifikation ist 30-40 Jahre alt und repräsentiert die fachliche Sicht (Baubestand). Diese Systematik diente bisher als Regelwerk, stößt bereits jetzt bei baulichen Sonderfällen und bei der Datenorganisation (IT-Sicht) an ihre Grenzen.

Erfahrungen aus dem bisherigen Einsatz und sich verändernde Rahmenbedingungen führen zu neuen Anforderungen, welche sich ergeben aus

- den sich verändernden Verwaltungsstrukturen,
- der Notwendigkeit der Berücksichtigung neuer Bauwerkstypen,
- der Notwendigkeit der Bereitstellung von Infrastruktur-Daten an Dritte,
- der Sicherstellung des Datenaustauschs mit anderen bestehenden und zukünftigen IT-Verfahren,
- der Notwendigkeit der Erneuerung und ggf. Standardisierung der Systemlandschaft sowie
- der damit verbundenen Notwendigkeit der Überarbeitung des Betriebskonzeptes.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die WADABA ist das zentrale Objektkataster der WSV. Die digitale Existenz jedes größeren Infrastruktur-Objektes der WSV beginnt mit der Definition in der WADABA. Der Datenbestand und das bestehende Verfahren WADABA stellen somit die fachliche und datentechnische Grundlage für eine Vielzahl von z.T. geschäftskritischen IT-Verfahren der WSV dar.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel ist ein Konzept zur Weiterentwicklung der WADABA. Um die Anforderungen an das zukünftige System exakt definieren zu können, muss der bestehende Bedarf beschrieben werden. WADABA ist zusammen mit den umgebenden Systemen anwendungsbezogen gewachsen. Eine geschlossene Darstellung des aktuellen Systemzustandes und des tatsächlichen Nutzungsprofils der WADABA liegt nicht vor, wird aber als notwendige Grundlage für die Ableitung von Entwicklungsperspektiven gesehen.

Begleitender Leitgedanke einer grundlegenden [technischen] Weiterentwicklung ist, dass die WADABA kein umfassendes, geschlossenes System zur Pflege und Recherche aller Objektdaten mehr sein sollte, sondern klar trennen muss zwischen

- technischer Datenverwaltung (Datenbankschicht),
- Katalog- und Stammdatenverwaltung,
- Fachschalen zur Pflege fachbereichsspezifischer Objektarten,
- Reporting und
- Schnittstellen.

Darüber hinaus nimmt die nachvollziehbare Ermittlung des Zustandes der Objektinformationen in der Datenbank eine besondere Bedeutung ein. Ein übergeordnetes Qualitätsmaß (Anforderungen an die Objektinformationen) liegt bisher nicht vor. Lediglich für Teilbestände der Objektinformationen wurden Sätze mit Qualitätsanforderungen beschrieben und tlw. im Ergebnis äußerst umfangreicher manueller Arbeiten realisiert.

## 2 Untersuchungsmethoden

Ausgehend von der aktuellen Systemarchitektur und dem Betriebskonzept erfolgt zunächst die Systemanalyse.

Das System wurde zunächst in seine Bestandteile zerlegt. Die Bewertung findet eigenständig für die Bestandteile nach einem Satz beschriebener Qualitätsmaße statt. Gemäß den ursprünglichen Entwicklungszielen sollte WADADA das so genannte führende System darstellen, welche die eindeutige Existenz von Infrastruktur-Informationen sicherstellt und wichtige Eigenschaften als Auskunftssystem vorhält. Aufgrund der zentralen Bedeutung der WADABA für andere IT-Verfahren wurde der Untersuchungsgegenstand auf die die WADABA umgebende Systemlandschaft ausgedehnt. Es wurden zunächst alle Systeme berücksichtigt, die in der Vergangenheit Informationen von WADABA konsumierten, dies im Wirkbetrieb regelmäßig tun bzw. zukünftig zu tun haben. Dabei erfolgt eine eigenständige Bewertung aller sich daraus ergebenden Beziehungen zwischen den Bestandteilen der Systemlandschaft und den Bestandteilen der WADABA, die in die Erstellung von Entwicklungsszenarien einfließen.

## 3 Ergebnisse

Mit der WADABA sollte der Objektkatalog der WSV gemäß Verwaltungsvorschrift VV-WSV 11 02 softwarebasiert realisiert und basierend darauf Detailinformationen zu ausgewählten Objekten und eine Fachdatenbank (Korrosionsschutz-Datenbank) geführt werden. Tatsächlich führt das System Informationen, die im Hinblick auf die zu erwartenden Entwicklungsszenarien in drei logische Bestandteile zerlegbar sind. Die Liste aller Objekte und Anlagen der WSV wird durch den Bereich I selbständige Objekte gebildet (Bild 1). Der zweite Bestandteil wird durch die konkurrierenden Definitionen der unselbständigen Objekte und der Komponenten gebildet.

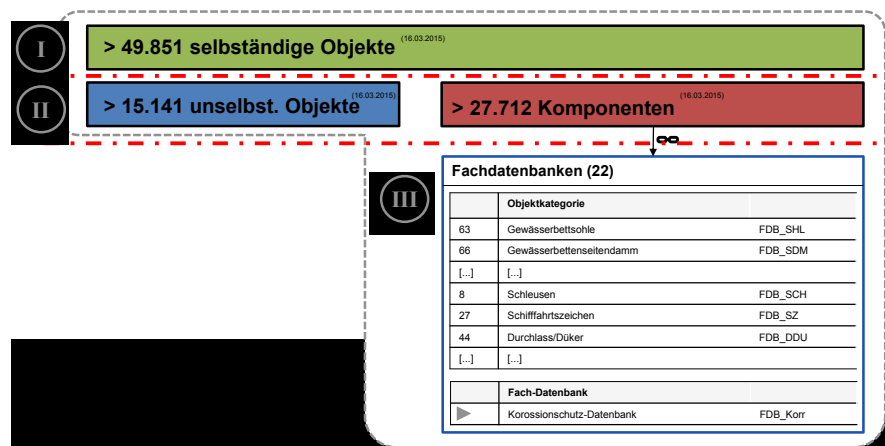


Bild 1: Bestandteile der WADABA

Bisher dienen die Komponenten ausschließlich der Organisation der Fachdatenbanken, welche den dritten Bestandteil der WADABA darstellen. Eine Ausnahme stellt die Objektart Gewässerbett dar. Fachinformationen werden hier über die unselbständigen Objekte verknüpft. Aus den Beziehungen im Datenbankschema wurden aktuell 22 Fachdatenbanken beschrieben.

Bild 2 verdeutlicht die Architektur der Objektinformationen. Die Systematik der Objektklassifizierung und der Teilgliederung ist grundsätzlich in VV-WSV 11 02 definiert. Der Zugang zu den Komponenten und den darüber verknüpften Fachdaten gelingt allerdings nur eingeschränkt, da die vorliegende WADABA die eigentliche Struktur der Daten nicht klar genug verdeutlicht.

Das zu lösende Problem stellen daher die zwei unabhängigen Verzweigungen (unselbständige Objekte und Komponenten) im Objektmodell dar, an welche Objektinformationen angehängt sind. Nachfolgende Tabelle verdeutlicht die Auswirkung am Beispiel der Schleusen. Die Anzahl der Objektteile Kammer und Tor weichen drastisch voneinander ab. Ferner sind die Informationen in beiden Strängen nicht durch interne Beziehungen verknüpft.

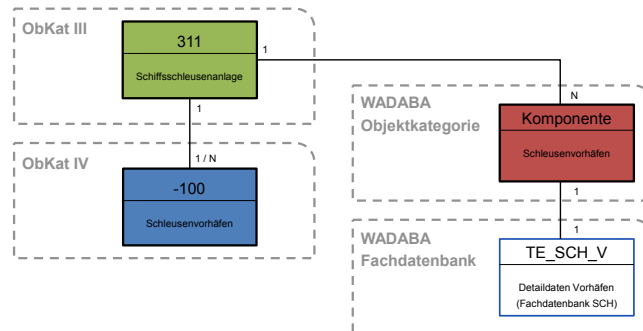


Bild 2: Architektur der Objektinformationen

Anfrage an WADABA (Stand 14.11.2014)	unselbständige Objekte (ObKat IV)	Komponenten
Anzahl Schleusenkammern	7 bzw. 9	487
Anzahl Schleusentore	1093	977

Tatsächlich hat man versucht, eine fehlende Verknüpfung über beschreibende Elemente in Freitextfeldern oder Zusatzkennzeichen zu realisieren. Solche Konstruktionen sind fehleranfällig und ungeeignet für IT-Systeme.

Weitere Erkenntnisse lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Das vorliegende System WADABA-Web ist im Grundsatz als modern zu bezeichnen. Im System vorhandene Funktionalität hätte zur Vereinfachung der Bedienung führen können, blieb aber bisher ungenutzt.
- Entscheidend für die Zukunftsfähigkeit des Systems wird die Einführung einer systemübergreifenden Objektidentifizierung sein. Damit verbunden wird die Benutzung von Attributen des Objektes zur Namensgebung (Objekt-Ident-Nr.) nicht mehr zulässig sein.
- Im Hinblick auf den angestrebten Austausch von Informationen wird ein Objektmodell zu definieren sein, welches den Anforderungen an maschinenlesbare Informationen genügt. Damit verbunden ergibt sich ein Datenaustauschformat und eine angestrebte WSVweit einheitlich anwendbare Infrastrukturschnittstelle.

Neben den dargestellten systematischen Defiziten des derzeitigen Datenmodells beruht ein Teil der Probleme in Hinblick auf Datenqualität und –aktualität auf nicht ausreichenden organisatorischen Regelungen. Die der Objektgliederung zugrundeliegende Verwaltungsvorschrift VV-WSV 1102 ist vor der Implementierung der WADABA als Objektkataster entstanden. Die Vorschrift enthält keine Regelungen zur Prozessen und Verantwortlichkeiten für die in der WADABA gehalten Daten. Es bedarf daher auch einer Entwicklung stabiler Betreuungs- und Pflegeprozesse.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016:

- Erstellung eines funktionalen und technischen Systemkonzepts
- Erstellung einer Organisationsstruktur
- Abstimmung der Konzepte

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2017.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Datenmanagement und Qualitätssicherung im Verkehrswasserbau**

**Netzplan-Nr.:** A39540700005

**Projektleiter:** T. Damrau, Abteilung Zentraler Service, Referat IT-Support (Z3)

**Bearbeiter/in:** Ch. Wosniok, Dienststelle Hamburg, Geschäftsstelle KFKI

K. Perras, Zentraler Service, Referat Verwaltung (Z1)

**E-Mail:** thomas.damrau@baw.de, christoph.wosniok@baw.de, katja.perras@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die BAW nutzt vielfältige selbst erzeugte Daten zur Erfüllung Ihrer speziellen fachlichen Aufgaben. Aufgrund der in den vergangenen Jahren rasant angestiegenen Datenmengen, der immer höheren Komplexität der hierfür vorzuhaltenden technischen Plattformen und der gerade aktuellen politischen und rechtlichen Veränderungen ist der Umgang und die Bereitstellung von Daten für die BAW neu zu definieren. Um den wissenschaftlichen Anspruch als technisch-wissenschaftliche Oberbehörde und Ressortforschungseinrichtung zu entsprechen ist es geboten ein abteilungsübergreifendes fachliches, organisatorisches und rechtliches Konzept für das Management und die Verwendung von Fachdaten zu entwickeln. Aufgrund der hohen Komplexität wird das Vorhaben in zwei Teilprojekte gegliedert.

#### **Teilprojekt 1 – Management von Fachdaten**

Es soll ein Konzept für die Optimierung des Simulationsdatenmanagements in der BAW aufgestellt und umgesetzt werden. In den Abteilungen Wasserbau im Binnenbereich (W) und Wasserbau im Küstenbereich (K) bilden vor allem Simulationen mittels numerischer und physikalischer Modelle die zentralen Methoden zur Bearbeitung der zunehmend komplexeren und stetig veränderlichen Projektaufgaben. Der Umgang mit den Modell- und Simulationsdaten und deren Dokumentation ist bislang sehr individuell gestaltet und dem einzelnen Bearbeiter überlassen. Vor dem Hintergrund des stetig anwachsenden Datenvolumens ist diese Vorgehensweise nicht mehr angemessen denn sie hat zunehmend gravierende Folgen wie eingeschränkte Wiederauffindbarkeit von Daten, erheblicher Aufwand für die Datenbeschaffung und -aufbereitung oder Kosten durch Speicherung und Sicherung unnötiger bzw. redundanter Daten.

#### **Teilprojekt 2 – Verwendungs- und Zugangskonzept**

Die BAW bietet bereits heute ein breites Portfolio an frei verfügbaren Daten und Informationen für die WSV, das BMVI, die Fachöffentlichkeit und die Allgemeinheit. Den politischen und rechtlichen Forderungen nach frei verfügbaren öffentlich finanzierten Daten und Informationen kommt die BAW als technisch-wissenschaftlicher Berater sowie als Ressortforschungsbehörde in vielen Bereichen bereits heute nach. Die Vielzahl an Aktivitäten stellt das hohe fachliche Potenzial der BAW als Wissensträger für den Verkehrswasserbau auf nationaler und internationaler Ebene dar. Dieses positive Heraushebungsmerkmal macht gleichzeitig die Herausforderung des Teilprojekts 2 deutlich: Ein fehlendes und einheitliches Rechte- und Verwendungskonzept der Fach- und Publikationsdaten der BAW. Die aktuelle Bereitstellung von frei verfügbaren Daten und Informationen für die jeweiligen Zielgruppen findet ohne rechtliches, organisatorisches und abteilungsübergreifendes Konzept statt. Die jeweiligen Aktivitäten führen ein „Eigenleben“ und sind für die Behörde BAW in sich nicht konsistent. Dem wissenschaftlichen Berater und Gutachter BAW fehlt es derzeit an einer rechtlich gesicherten Konzeption für die Verwendung und Bereitstellung des eigenen Wissens. Eine Positionierung der Haushaltung zur Erarbeitung einer Gesamtstrategie für einen professionellen Umgang mit Open-Data und Open-Access ist dabei unabdingbar.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Einführung von Richtlinien und Systemen zum Management von Fachdaten und Publikationen führt in der BAW zu einer deutlichen Effizienzsteigerung in der Projektbearbeitung, schafft Transparenz und ermöglicht über die Festlegung von Standards die Sicherung und Kontrollierbarkeit der erreichbaren Qualität. Gleichzeitig schaffen die Maßnahmen die Basis für eine qualitätsgesicherte Weitergabe der Fachdaten der BAW an die WSV bzw. an Dritte. Dieses fachliche strukturierte und

rechtlich gesicherte Vorgehen schafft eine wesentliche Grundlage zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen.

Die Entwicklung und Einführung eines bedarfsorientierten und optimierten Workflow zur Datenbereitstellung vergrößert das Verständnis der Nutzer für die Daten und sorgt gleichzeitig für eine interne und externe Qualitätssicherung der Daten.

Die fachliche und gesellschaftliche Wertschöpfung von BAW-Produkten wird durch die Veröffentlichung von Fachdaten und Publikationen gesteigert. Die Fachöffentlichkeit kann so explizit angesprochen werden. Das breite Leistungsportfolio der BAW als wissenschaftliche Behörde wird noch deutlicher bekannt gemacht.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Es soll ein einheitliches Datenmanagement für Fachdaten eingeführt werden, welches ein Metadatenmanagement einschließt. Damit wird das Ziel einer langfristigen und effizienten Datenhaltung und -bereitstellung für verschiedene Zwecke und Zielgruppen (z.B. via Geoportal.de oder govdata.de) gleichzeitig gewährleistet. Die Bereitstellung von standardisierten und qualitätsgesicherten Systemen zur Recherche, Bearbeitung, Dokumentation, Analyse und Visualisierung steht dabei im Vordergrund. Letztendlich soll das Vorhaben als ein Baustein für ein umfassendes Projektmanagementsystem für die Bearbeitung verkehrswasserbaulicher Projekte durch die BAW dienen.

Es soll eine einheitliche auf dem Open-Access Prinzip basierende Strategie für den Zugang zu Fachdaten und Publikationen entwickelt werden, welche die besonderen Belange der BAW sowohl als gutachterlicher Berater der WSV, wie auch als Ressortforschungseinrichtung berücksichtigen.

Auf Basis der erzielten organisatorischen, rechtlichen und technischen Ergebnissen des Vorhabens wird die Voraussetzung für ein einheitliches Management der relevanten Fachdaten geschaffen. Simulationsdaten bilden dabei einen wesentlichen Teil des gesamten Fachdatenbestands der BAW. Aufgrund der hohen technischen Komplexität fokussiert das Teilprojekt 1 auf diesen Datenbereich. Im Teilprojekt 2 wird neben den Fachdaten auch das Optimierungspotenzial bei der Bereitstellung von Publikationen der BAW betrachtet.

## **2 Untersuchungsmethoden**

### **Teilprojekt 1**

Die Untersuchungen für dieses Vorhaben berücksichtigen die aktuell bestehenden Systeme und Richtlinien zum Datenmanagement der Abteilungen W und K, insbesondere im Hinblick auf eine Integration von Recherche, Auswertung und Präsentation von Daten und Ergebnissen. Für deren Erfassung wird zuerst eine umfangreiche Analyse der Ist-Situation durchgeführt. Hieraus resultiert ein Soll-Konzept für ein einheitliches Management der relevanten Fachdaten mit Vorschlägen für die Durchführung organisatorischer Maßnahmen und die Bereitstellung von IT-Systemen. Anhand von exemplarischen Projekten zur Umsetzung dieser Vorschläge in den Abteilungen W und K soll die Validität des Soll-Konzeptes überprüft werden.

### **Teilprojekt 2**

Ermittlung und Aufbereitung der rechtlichen Anforderungen für eine offene Datenbereitstellung auf Basis der aktuellen supranationalen und nationalen Rechtslage unter gleichzeitiger Berücksichtigung der gegenwertigen politischen Entwicklung und Förderung der Themenbereiche Open-Data und Open-Access. Als Ergebnis dieser Untersuchung wird im ersten Schritt eine Open-Data und Open-Access-Policy erarbeitet, welche anschließend durch die Leitung der BAW eingeführt wird. Die verbindliche Festlegung dieser Richtlinie durch die Hausleitung stellt im Teilprojekt 1 den ersten entscheidenden Meilenstein für die Akzeptanz und Transparenz dieses Vorhabens innerhalb der BAW dar.

Auf dieser Basis wird ein umfassendes Rechtenkonzept für die Bereitstellung und öffentliche Verwendung von Fachdaten und Publikationen der BAW entworfen. Nach der Fertigstellung des Soll-Konzeptes im Teilprojekt 1, inklusive der Festlegung eines verbindlichen Metadatenystems für die

Simulationsdaten, erfolgt eine bedarfsgerechte Anpassung des Rechte- und Verwendungskonzepts zur weiteren Umsetzung innerhalb der BAW.

Im Anschluss an die Konzeptionsphase und die Zusammenführung der Ergebnisse aus den beiden Teilprojekten steht die Umsetzung der für die langfristige Sicherstellung dieser Ergebnisse notwendigen organisatorischen und technischen Maßnahmen im Vordergrund.

### 3 Ergebnisse

#### Teilprojekt 1

Die Erhebung des Ist-Stands wurde begonnen. Dazu wurden in den Referaten der Abteilungen W und K im Zusammenhang mit dem Datenmanagement eingesetzte Verfahren und Vorgehensweisen erfasst. Im Rahmen der Erhebung wurde deutlich, dass die Realisierung einer einheitlichen Projektmanagementumgebung eine Randbedingung für die erfolgreiche Optimierung des Datenmanagements sein könnte. Diese möglicherweise bestehende Abhängigkeit soll während der weiteren Bearbeitung des Vorhabens noch überprüft werden.

#### Teilprojekt 2

Die Erhebung des Ist-Stands der BAW zur Bereitstellung von Fachpublikationen für den internen sowie für den externen Gebrauch wurde durchgeführt. Im Fokus der Erhebung lag die Darstellung und Beschreibung der vorhandenen Arbeits- und Bereitstellungsprozesse in Bezug auf Fachpublikationen der BAW. Auf Basis der Ergebnisse der Ist-Analyse wurde ein erster Entwurf für die Konzeptionierung und Umsetzung des Open-Access-Prozesses in der BAW entwickelt. Hierbei lagen insbesondere rechtliche und organisatorische Anforderungen im Fokus.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Erarbeitung eines Soll-Konzeptes für das Fachdatenmanagement mit dem Fokus auf Simulationsdaten.

Auswahl repräsentativer Aufträge aus den Abteilungen W und K zur konkreten Untersuchung hinsichtlich des Datenmanagements.

Festlegung der relevanten Simulations- und Projektdaten sowie der abgeleiteten Datenprodukte, die in einem entsprechenden Datenmanagementsystem vorgehalten werden sollen.

Festlegung von im Rahmen des Vorhabens umzusetzenden Maßnahmen zur Optimierung des Simulationsdatenmanagements.

Einführung einer verbindlichen Open-Data und Open-Access Policy für die BAW.

Erstellung eines Rechte- und Verwendungskonzepts von Fachdaten anhand der gesetzlichen Vorgaben.

2016: Festlegung eines verbindlichen Metadatenstandards für Simulationsdaten und Bereitstellung einer Softwarelösung zur möglichst automatisierten Erzeugung der Metadaten während des Projekt-Workflows.

Einführung eines Managementsystems zur Verwaltung und Versionierung der Simulationsdaten sowie der Metadaten, im Kontext zum organisatorischen und rechtlich ausgerichteten Projektmanagement. Die Verknüpfung der Simulationsdaten mit anderen Informationsquellen soll mit diesem System ebenfalls realisiert werden.

2017: Anpassung des Simulations-Workflows (u.a. Umsetzung standardisierter Datenformate).

Untersuchung der Anforderungen an eine geeignete IT-Infrastruktur.

Vorbereitung einer verbindlichen Einführung der technischen Systeme in der BAW.

Einführung eines fachwissenschaftlichen Repositories zur standardisierten und qualitätsgesicherten offenen Bereitstellung wissenschaftlicher Fachpublikationen.

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2017.

### 5 Literatur

Perras, P. (2014): Wissenschaft trifft Open Access: Ein Spannungsverhältnis im Urheberrecht, Masterarbeit, Hochschule für öffentliche Verwaltung Kehl, 2014.

### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße - Schiffsdynamik**

**Netzplan-Nr.:** A39550210055

**Projektleiter:** Dr.-Ing. K. Uliczka, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**Bearbeiterin:** Dipl.-Ing. (FH) H. Jansch, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** klemens.uliczka@baw.de; hanne.jansch@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße (WSS) erfordert aufgrund der Größenentwicklung der Seeschiffe und der daraus notwendigen Befahrbarkeitsanalyse der Tideästuar fortlaufende Forschungsanstrengungen auf den Gebieten der schiffserzeugten Belastungen, der Schiffsdynamik und der Schiffsführungssimulation.

Dieses Forschungsgebiet wird in drei verschiedenen Teilprojekten bearbeitet, deren Schwerpunkte zum einen auf der Schiffsdynamik (u.a. Squat, Trimm, Bank-Effekt), zum anderen auf der Weiterentwicklung mathematischer Verfahren zur Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße sowie auf der Entwicklung der Schiffsführungssimulation für die Belange der WSV liegen. Das aus dem Forschungsprojekt WSS entwickelte Teilprojekt Schiffsdynamik erarbeitet u.a. Basisdaten zum fahrdynamischen Verhalten sehr großer Containerschiffe bei Revierfahrt (z.B. Squat, Trimm) sowie zur Wechselwirkung dieser großen Fahrzeuge mit verschiedenen Uferböschungen (z.B. abstands- und von der Böschungsneigung abhängige Querkkräfte und Giermomente infolge des Bank-Effekts). Die jeweils parallel mit zu erfassenden schiffserzeugten Wasserspiegelauslenkungen (Schiffswellen) und Strömungen ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung der physikalischen Prozesse bei der Revierfahrt eines großen Fahrzeugs.

Abgesicherte, quantitative Prognosen des dynamischen Fahrverhaltens (Squat und Trimm) im seitlich begrenzten, extremen Flachwasser sind mit der Methode des hydraulischen Modellversuchs in einem fachlich hinreichenden Maßstab gewährleistet. Des Weiteren sind derzeit für eine abgesicherte Bearbeitung der Aufgabenstellung validierte und international anerkannte hydrodynamisch-numerische RANSE-Verfahren als annähernd gleichwertig zum Modellversuch anzusehen.

Die Weiterentwicklung potentialtheoretischer Verfahren im Auftrag der BAW für die Belange der WSV zeigte bei engen Seeschiffahrtsstraßen wie z.B. dem NOK die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten dieser Verfahren auf, so dass nach intensiver Fachdiskussion vorerst die Methodenentwicklung sowohl zur Erfassung weiterer Validierungsdaten in der Natur als auch Verfahren zur Qualitätssicherung der Daten Dritter durch die BAW als vordringliche Entwicklungsarbeit erachtet wurde.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Aufgrund der Größenentwicklung der Containerschiffahrt (Inbetriebnahme von 19.100 TEU-Containerschiffen in 2014, Länge ca. 400 m, Breite ca. 60 m) und der begrenzten Ausbaupazität der Seeschiffahrtsstraßen wird zukünftig deren Befahrbarkeitsanalyse für eine optimale Nutzung durch die Schiffahrt eine wachsende Bedeutung hinsichtlich der Schiffsdynamik, aber auch bezüglich der wirtschaftlichen Unterhaltung der Schiffahrtsstraßen (z.B. schiffserzeugte Belastungen der Ufer) bekommen. Eine detaillierte Kenntnis u.a. der Schiffsdynamik (Squat, Trimm, Bank-Effekt und Schiff-Schiff-Interaktion) der zukünftig in den Revieren der WSV verkehrenden großen Fahrzeuge ermöglicht u.a. eine fachlich abgesicherte und für die WSV-Revire validierte Anwendung von z.B. Tidefahrplänen zur Optimierung der Befahrbarkeit der Seeschiffahrtsstraßen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das wesentliche Ziel der Untersuchungen des Teilprojekts *Schiffsdynamik* ist die Bereitstellung von fachlich abgesicherten Daten zur Diagnose und Prognose des Verhaltens großer Seeschiffe (Squat, Trimm und Bank-Effekt) beim Befahren der Flachwasserreviere durch die BAW.



Weiterhin sind die schiffsspezifischen Squat- und Trimmwerte, Querkräfte und Giermomente u.a. in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit (Fahrt durch Wasser), des Teilquerschnittsverhältnisses, des Passierabstands vom Ufer und der Neigung der Uferböschung für den wasserstraßenabhängigen maximal zulässigen Tiefgang (Bemessungstiefgang für die Fahrrinne) zu bestimmen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Forschungsprojekts Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße werden Validierungsdaten für die Weiterentwicklung numerischer Verfahren erfasst, ausgewertet und aufbereitet. Die umfangreichen Untersuchungen im hydraulischen Maßstabsmodell (M 1:40) zur Quantifizierung von Querkräften und Giermomenten in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit und Schiffgröße, der Uferneigung, des Passierabstands sowie der Kielfreiheit wurden abgeschlossen. Derzeit werden die Ergebnisse für die Implementierung in die Schiffsführungssimulation vorbereitet (vgl. FuE-Projekt A39550270132).

Die Methodenentwicklung zur Qualitätssicherung von Messungen in der Natur ist ein grundlegender Baustein für eine effiziente und wirtschaftliche Beratung der WSV.

## 3 Ergebnisse

Für die WSV wurde anhand der Fachdiskussion die Erkenntnis abgeleitet, dass eine direkte Berechnung des fahrdynamischen Verhaltens von Schiffen für geometrisch enge Querschnitte wie z.B. dem NOK mit zeitlich aufwändigen, hochauflösenden, reibungsbehafteten validierten RANSE-Modellen für die Tauchung (Squat) und den Trimm vorerst noch auf den Weg zu Stand von Technik und Wissenschaft zu bewerten ist. Die Weiterentwicklung der numerischen Verfahren sowie entsprechende Berechnungen der BAW sind dem FuE-Bericht „Numerische Berechnungen – Schiffshydrodynamik“ (A39550270133) zu entnehmen.

Die BAW berät derzeit das WSA Hamburg zur weiteren Absicherung und Validierung des Tidefahrplans Elbe hinsichtlich der Vergabe, Durchführung und Analyse von Messungen zur Schiffsdynamik großer Containerschiffe bei Revierfahrt. Im Rahmen des FuE-Projekts erfolgte die Methodenentwicklung sowohl zur Erfassung der Validierungsdaten in der Natur als auch zur erforderlichen Qualitätssicherung der Daten Dritter durch die BAW.

Der Schwerpunkt des abgelaufenen Jahres lag weiterhin in der Qualitätssicherung der in 2015 durchgeführten Messkampagnen anhand der bisher entwickelten methodischen Ansätze sowie deren Überprüfung und Weiterentwicklung anhand real gemessener Daten.

Die Auswirkungen des Ausfalls eines Messparameters auf die Genauigkeit der Squat-Messergebnisse wird am Beispiel der für die Squatberechnungen erforderlichen ortsabhängigen Dichte des Wassers aufgezeigt. Bild 1 zeigt die aus GNSS-Daten berechneten Standardabweichungen des Hecksquats sowie die Standardabweichung der ortsabhängigen Tiefgangsänderung während der Fahrt zwischen Brunsbüttel und Nordsee. Die ausgeschriebene maximale Standardabweichung des zu erfassenden Squats betrug  $\sigma_s = 0,10$  m und des ortsabhängigen Tiefgangs  $\sigma_t = 0,09$  m. Während fünf Fahrten die Genauigkeitsanforderungen der WSV problemlos erfüllen (Bild 1, grüne und blaue Zeitreihen), führte bei der sechsten Fahrt der Ausfall nur eines einzelnen Messparameters, der Dichte, seewärts von Cuxhaven zu einer Überschreitung der erforderlichen Genauigkeit der gesamten Messung. Da die Dichteänderung vom Zeitpunkt des Messgeräteausfalls bis zur festgelegten Position auf See extrapoliert werden musste, ergab sich somit eine ortsabhängige Ungenauigkeitszunahme beim Squat um 50 % bis zu  $\sigma_s = 0,15$  m bzw. eine Tiefgangsungenauigkeit bis zu  $\sigma_t = 0,12$  m (Bild 1, jeweils rote Zeitreihe, linearer Verlauf).

Bei einem erforderlichen Einsatz von 12 schiffsgestützten Messsystemen zur Erfassung des revierabhängigen Squat bemessungsrelevanter Fahrzeuge auf Seeschiffahrtsstraßen ist allein aus wirtschaftlichen Gründen bei einer Messkampagne nicht nur eine Redundanz der Erfassungssysteme sondern vor allem eine detaillierte Qualitätssicherung der einzelnen Messergebnisse sowie die entsprechenden Auswirkungen auf das Gesamtergebnis unabdingbar.

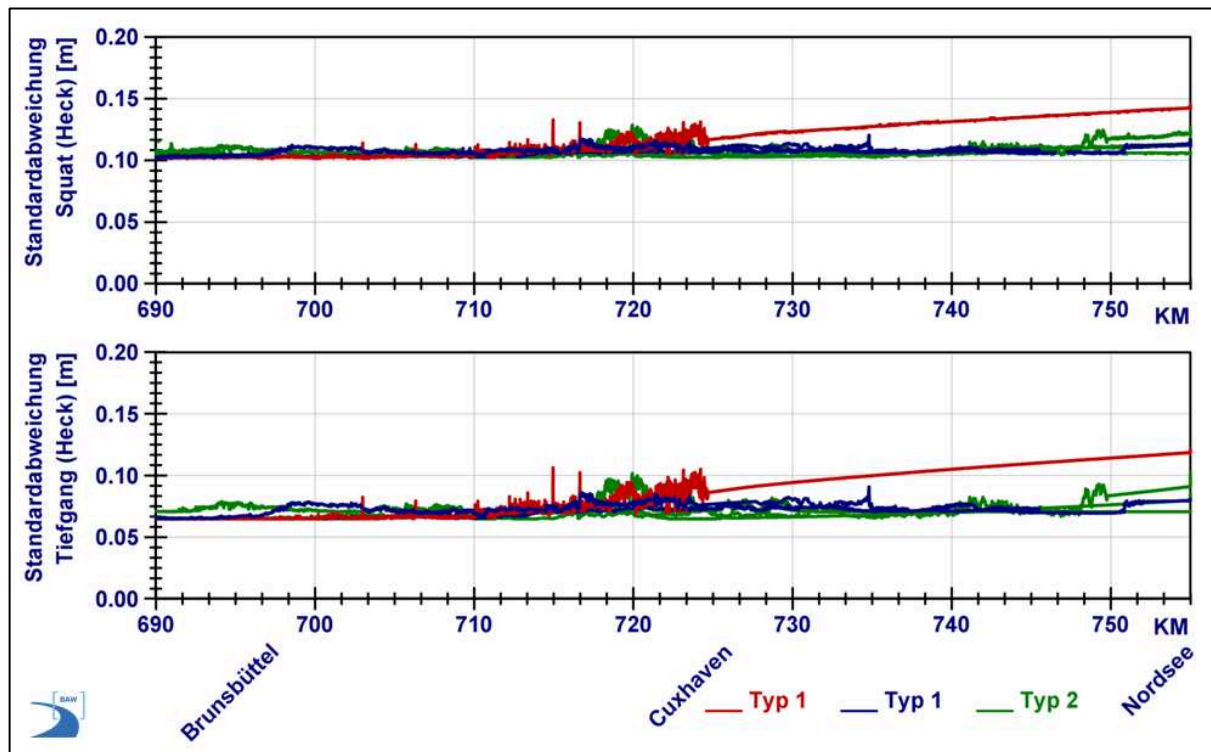


Bild 1: Zunahme der Ungenauigkeit des Squat (oben, rote Gerade) und der Tiefgangsänderung (unten, rote Gerade) anhand der Berechnung der Standardabweichung aufgrund des Ausfalls eines schiffsgestützten Sensors zur Dichtemessung

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Mit der Vergabe sowohl des Projektmanagements als auch der Durchführung und Analyse der Messkampagnen werden für die BAW weiterhin umfangreiche Entwicklungsarbeiten zur Qualitätssicherung bezüglich der durch den Auftragnehmer zu erfassenden und zu bearbeitenden Daten anfallen. Die von der BAW zu entwickelnde Methodik zur Qualitätssicherung wird nach den bisherigen Erkenntnissen über die gesamte Zeit der Projektdauer (ca. 20 Messkampagnen) an die Erfahrungen mit dem Auftragnehmer anzupassen sein. Aufgrund der komplexen Messkampagnen erforderte die laufende Qualitätssicherung der bis heute vorgenommenen Messungen in der Natur einen deutlichen Mehraufwand an Prüfverfahren, Beratung und Schulung des Auftragnehmers im Rahmen des FuE-Projekts, so dass eine Projektverlängerung bis Ende 2017 notwendig wurde.

Laufzeit des Vorhabens: 2002 bis 2017 (beantragt).

#### 5 Literatur

- / -

#### 6 Veröffentlichungen

- Behm, J.; Jansch, H. (2015): Anforderung der Seeschifffahrt - Optimale Nutzung der Bundeswasserstraße Elbe, BAW-Kolloquium, Hamburg
- Reiter, B.; Albers, Th.; Jansch, H. (2015): Applicability of artificial neural networks to squat prediction of Very Large and Ultra Large Container Vessels based on measurements on the Elbe estuary, 4th MASHCON 2016, Hamburg (eingerei)

## **Schiffsführungssimulation der Revierfahrt (SFS-R)**

**Netzplan-Nr.:** A39550270132

**Projektleiter:** Dr.-Ing. C.-U. Böttner, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** carl-uwe.boettner@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Schiffsführungssimulatoren werden seit den 60er Jahren erfolgreich in der Aus- und Weiterbildung von nautischem Personal eingesetzt. Da seither die Schiffsgrößen kontinuierlich gesteigert werden, sind auch die Kosten für die Bereitstellung und Unterhaltung der Wasserstraßen überproportional gestiegen. Einsparungen sind nur möglich, indem der Dimensionierung der Seeschiffahrtstraße ein hohes Gewicht eingeräumt wird und diese nur in den Dimensionen bereitgestellt wird, die tatsächlich nötig sind, um die geforderte Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu gewährleisten.

Für die Bemessung bedeutet dies, dass ergänzend zu den bewährten Ingenieuransätzen und Richtlinien der tatsächliche Raumbedarf festgestellt werden muss. Hierfür muss zum einen die mathematisch numerische Simulation der Schiffsdynamik und zum anderen die Schiffsführungssimulation eingesetzt werden. Der virtuellen Befahrung kommt eine zentrale Bedeutung zu, wenn die Dimensionen auf das erforderliche Maß begrenzt werden sollen, da sie eine Überprüfung auf nautische Schwachstellen ermöglicht, die sonst möglicherweise erst nach Fertigstellung auffielen und deren Korrektur dann meist sehr kostspielig würde.

Um diese Funktion erfüllen zu können, muss der Schiffsführungssimulator das Verhalten und die Fahrdynamik des Seeschiffs nicht nur physikalisch ähnlich abbilden, wie es für eine Ausbildung gemäß STCW-95 vollkommen ausreichend ist, sondern mit hoher Präzision vorhersagen und berücksichtigen. Für die Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse sind alle Prozesse bei Fahrt im seitlich begrenzten Flachwasser von übergeordneter Bedeutung und somit im Simulator naturähnlich abzubilden, die sonst in der Ausbildung von nautischem Personal an einem Simulator nur als Phänomen spürbar und erfahrbare sein müssen.

Ziel dieses Vorhabens ist es daher, fahrdynamische Modelle bestehender Schiffsführungssimulatoren so zu verfeinern, dass sie für die Simulation der Revierfahrt von Seeschiffen erweitert und ergänzt werden. Dies soll nach Möglichkeit so erfolgen, dass die WSV diese Entwicklungen in einer Simulation zur Bemessung verwenden kann, ohne dafür in der Wahl des Simulators oder Simulatorbetreibers eingeschränkt zu sein.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine fachlich abgesicherte Möglichkeit zur verbesserten Ausnutzung der Seeschiffahrtsstraßen bietet ein immenses Einsparpotential bei den Unterhaltungskosten. Dabei muss im Vorfeld der Nachweis der Gewährleistung der Leichtigkeit und Sicherheit des Verkehrs trotz möglichst wirtschaftlicher Bemessung erbracht werden können, um erhöhte Folgekosten für nachträgliche Anpassung der Wasserstraße und Reparaturen durch Unfälle auszuschließen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Untersuchungsziel ist die Ermittlung und Festlegung der notwendigen Präzision der fahrdynamischen Modelle in der Schiffsführungssimulation zur Absicherung der Bemessung. Parallel dazu erfolgt die Entwicklung von Modellen und Ansätzen der Fahrdynamik von Seeschiffen bei Flachwasserbedingungen entsprechend den ermittelten Vorgaben und deren Bereitstellung zur Einbindung in Schiffsführungssimulationen zur Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse.

## 2 Untersuchungsmethoden

Es werden verschiedene Methoden verfolgt und eingesetzt. Zunächst wird eine Sensitivitätsstudie zur Bedeutung der unterschiedlichen Anteile der Fahrdynamik für die Bemessung der Wasserstraße durchgeführt. Hier werden die einzelnen fahrdynamischen Größen und Effekte gemeinsam mit der jeweiligen notwendigen Genauigkeit für eine belastbare, wirklichkeitsgetreue Simulation der Revierfahrt ermittelt. Daraus ergeben sich direkt die Aufgaben für die Entwicklung der einzelnen analytischen Ansätze und fahrdynamischen Modelle. Im letzten Schritt werden diese in Form von Modellmodulen zur Verwendung bei Simulationen der Revierfahrt in Schiffsführungssimulatoren aufbereitet und der WSV bereitgestellt. Die Entwicklung der analytischen Ansätze und fahrdynamischen Modelle baut auf den Ergebnissen (in Form von Validierungsdaten und analytisch funktionalen oder tabellarischen Eingabewerten) der beiden anderen Teilprojekte der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiffahrtstraße auf.

## 3 Ergebnisse

Bei der Erstellung und Einstellung von fahrdynamischen Koeffizienten für die Schiffsführungssimulation besteht eine Unkenntnis bezüglich der Breite des Gültigkeitsbereichs der Koeffizienten zum Propellerstrahl. In der Realität ist die Strahlgeschwindigkeit eine Größe, die aus einem Kennfeld aus Schubbelastungsgrad, Drehzahl, Fahrt durchs Wasser und Gierwinkel bestimmt ist. Für die Schiffsführungssimulation wird dieser komplexe Zusammenhang zwangsläufig vereinfacht und häufig auf einen Interaktionskoeffizienten, der (vereinfacht) mittels Propellerdrehzahl und Fahrt durchs Wasser die Anströmung am Ruderblatt bestimmt. Um die Approximationsgüte dieses Ansatzes einschätzen zu können, wurden umfangreiche numerische Simulationen zur Ruderblatt-Anströmung in der Manövrier-situation (Bild 5) durchgeführt.

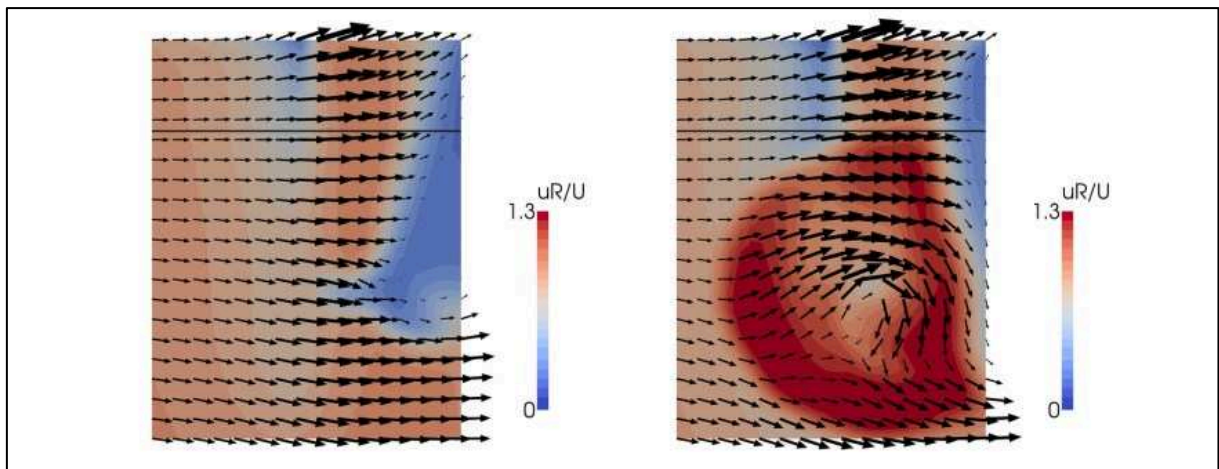


Bild 5: Anströmungsverhältnisse in einer Ebene kurz vorm Ruderblatt für  $h/T=1,3$  und Driften mit  $\beta=20^\circ$ , links ohne und rechts mit Propellerwirkung.

Die Bewegung und Reaktion von Schiffen in einem Schiffsführungssimulator wird durch einen Satz an Koeffizienten festgelegt. Dieser Satz legt die Unterschiede zwischen den verschiedenen Schiffen in einer Simulation fest. Nun verhält sich ein Containerschiff anders als ein Tanker oder ein Kreuzfahrtschiff, dafür ist die Wahl der richtigen Koeffizienten notwendig. Aus der Praxis und der Theorie ist hinlänglich bekannt, dass das Fahrverhalten ein und desselben Schiffes sich ebenfalls regelmäßig verändert, nämlich immer dann, wenn sich der Beladungszustand in Form von Trimm und Tiefgang ändert. Dem Umstand wird bislang durch Wahl eines geeigneten neuen Satz an Koeffizienten Rechnung getragen. Dies bedeutet dass ein neues Schiff im Simulator fahrdynamisch kalibriert und verifiziert werden muss.

Im Berichtsjahr 2015 wurde der Frage nachgegangen, ob und in welchen Grenzen, ein gemeinsamer Satz an Koeffizienten für ein Schiff mit verschiedenen Beladungszuständen im Simulator möglich ist. Hierfür wurden numerische Simulationen zur Bestimmung der im Schiffsführungssimulator zur Einstellung des Fahrverhaltens der Schiffe benötigte Koeffizienten durchgeführt. Im ersten Teil liegt der

Schwerpunkt auf der Varianz der Manövrierkoeffizienten durch Veränderung der Schwimm Lage (Bild 6). Dann werden die Manövrierkoeffizienten für verschiedene Tiefgänge, die die charakteristische Varianz anlaufender Containerschiffe in der deutschen Bucht widerspiegeln, bestimmt.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Varianz der Koeffizienten zu bestimmen und nach Möglichkeit eine kleine Anzahl an fahrdynamischen Koeffizienten festzulegen, der in der Schiffsführungssimulation dynamisch adaptiv festgelegt werden muss. Erste Auswertungen der numerischen Ergebnisse (Bild 7) lassen erwarten, dass dieser Ansatz durchführbar ist.

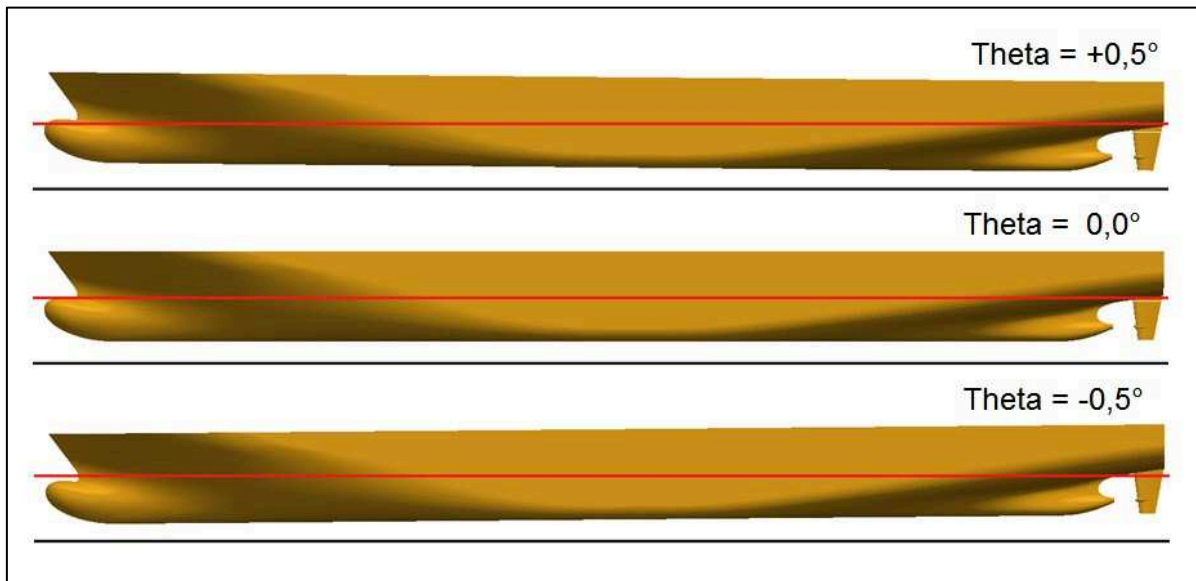


Bild 6: Darstellung der drei Trimmwinkel, die an einem 14 Tsd. TEU - Containerschiff untersucht wurden.

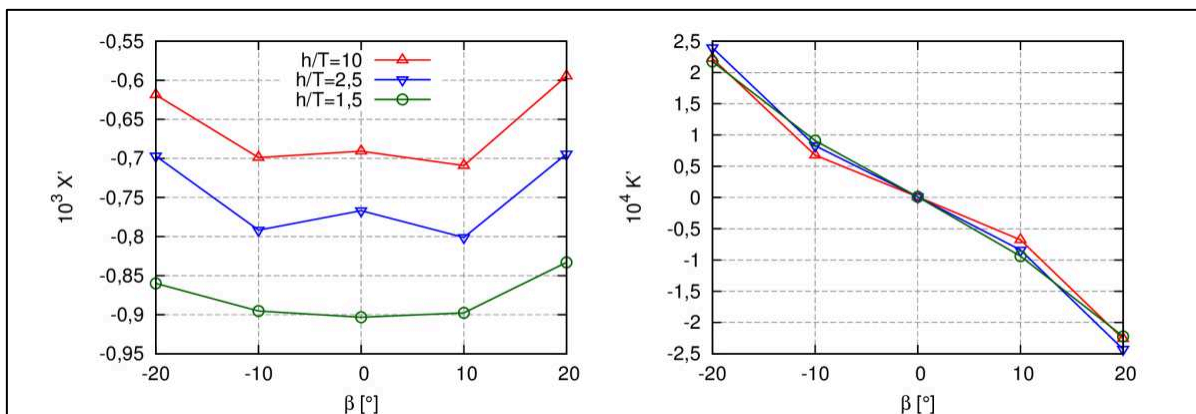


Bild 7: Einfluss der Wassertiefe auf stationäres Driften, Teil der Untersuchungen zum Trimm einfluss.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Der Simulator erhielt Ende November 2015 einen Upgrade auf den aktuellen Softwarestand (ANS6000) und verfügt seither über die vom Hersteller gemeinsam mit der BAW weiter entwickelte Plugin-Schnittstelle. Dadurch können von nun an Erkenntnisse und Ergebnisse aus diesem Forschungsprojekt in Form von Plugins als Erweiterung der fahrdynamischen Modelle einer Schiffsführungssimulation zugeführt und einem Praxis-Test unterzogen werden.

Das Projekt wurde zum Ende des Jahres 2015 beendet. Die Entwicklung von Plugins und deren Anwendung in laufende Untersuchungen am Schiffsführungssimulator wird weiter verfolgt und in einem anderen Rahmen umgesetzt werden.

Erstellung des Abschlussberichts in 2016.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2016.

## 5 Literatur

-/-

## 6 Veröffentlichungen

- Böttner, C.-U. (2014): Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße – Methoden zur Bearbeitung von Fragestellungen der WSV. Vortrag: 35. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik/Meerestechnik der Bundesanstalt für Wasserbau, der Universität Duisburg-Essen und des Entwicklungszentrums für Schiffstechnik und Transportsysteme, Duisburg, 15./16. Mai 2014.
- Böttner, C.-U. (2014): Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße – Methoden zur Bearbeitung von Fragestellungen der WSV. Tagungsband: 35. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik/Meerestechnik der Bundesanstalt für Wasserbau, der Universität Duisburg-Essen und des Entwicklungszentrums für Schiffstechnik und Transportsysteme, Duisburg, 15./16. Mai 2014.
- Böttner, C.-U., Uliczka, K., Carstens, D., Sponholz, J. (2013): „Free Sailing Manoeuvres for Tuning of Analytical Shallow Water Models“. Vortrag: Third International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water, June 03 - 05, 2013, Ghent, Belgium
- Böttner, C.-U., Uliczka, K., Carstens, D., Sponholz, J. (2013): „Free Sailing Manoeuvres for Tuning of Analytical Shallow Water Models“. Tagungsband: Third International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water, June 03 - 05, 2013, Ghent, Belgium
- Böttner, C.-U. (2013): „Manöviereinsimulation für den Wasserbau bei Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse von Wasserstraßen“. Vortrag, Kolloquium „Sea the Future“, 13. Dezember 2013, Berlin
- Böttner, C.-U. (2012): „Schiffsführungssimulation der Revierfahrt“. Vortrag: FuE Kolloquium der BAW, 21. September 2012, Hamburg
- Böttner, C.-U. (2012): „Schiffsführungssimulation der Revierfahrt“. Tagungsband: FuE Kolloquium der BAW, 21. September 2012, Hamburg
- Sponholz, J. (2011): „Optimierung der Flachwasser -Manöviereigenschaften eines Schiffsmodells des Ship Handling Simulators, auf Grundlage einer Serie von Versuchsfahrten mit einem Maßstabsmodell“ Diplomarbeit, Hochschule Bremen, 2011

## **Numerische Berechnung der Schiffshydrodynamik und Manövrierfähigkeit im Flachwasser (SHD-F)**

**Netzplan-Nr.:** A39550270133

**Projektleiter:** Dr.-Ing. C.-U. Böttner, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** carl-uwe.boettner@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Fragestellung besteht aus der Bestimmung der Strömungsverhältnisse und Transportvorgänge in der Umgebung des Schiffs und in der Wasserstraße. Während in den vergangenen Jahrzehnten eine rege Forschungs- und Entwicklungstätigkeit bei der Schiffsumströmung zu verzeichnen ist, wurde der Aspekt des Flachwassereinflusses und der geringen Kieflreiheit bisher wenig beachtet. Das liegt darin begründet, dass dieser Fahrzustand in der Dienstzeit eines Schiffes nur zu einem geringen Teil vorkommt und daher für die Schiffseigner eine untergeordnete Rolle spielt, aber auch darin, dass die numerische Modellierung noch erheblich anspruchsvoller ist, wenn Verblockungseffekte und sich vereinigende Grenzschichten zu berücksichtigen sind. Für die WSV ist hingegen die Revierfahrt unter Flachwassereinfluss der einzig relevante Fahrzustand. In der jüngsten Vergangenheit haben Rechnerleistung und Speicherkapazitäten einen Stand erreicht, der es ermöglicht, Kräfte, Momente und die auftretende Fahrdynamik numerisch vorherzusagen und zu beschreiben. Damit werden dringend benötigte Daten und Werte für die Bemessung und die wirtschaftliche Ausnutzung der Seeschiffahrtsstraßen erreichbar, die sich experimentell, aus dem physikalischen Modellversuch oder aus Naturmessungen, nur sehr aufwändig oder gar nicht gewinnen lassen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Verfügbarkeit eines Verfahrens zur Vorhersage fahrdynamischer Größen im Flachwasser ist bei vielen Aufgaben der WSV hilfreich. Häufig existieren die Schiffe, zu denen die Fragestellung erarbeitet wird, nicht oder noch nicht, dennoch müssen Aussagen zur Befahrbarkeit gemacht und verbindliche Entscheidungen getroffen werden. Hierfür ist die Verfügbarkeit einer verlässlichen Datenquelle in Form eines numerischen Verfahrens ein wichtiges Werkzeug von großer Bedeutung.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel in diesem Teilprojekt der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffahrtsstraße ist es, bestehende und verfügbare numerische Verfahren zur strömungsmechanischen Berechnung der Schiffshydrodynamik zu validieren, zu erweitern und zu ergänzen um künftig Verfahren bereit zu stellen, die als verlässlich zur Vorhersage von Kennwerten der Schiffsdynamik im Flachwasser anerkannt sind.

### **2 Untersuchungsmethoden**

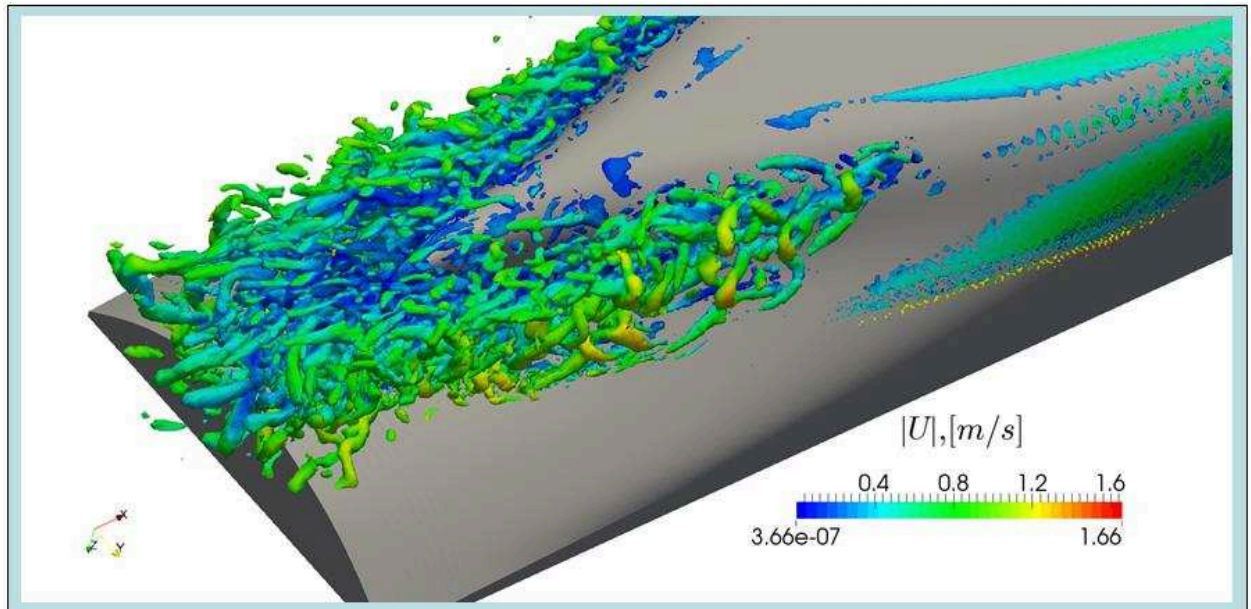
Verfügbare bestehende Verfahren werden anhand von experimentellen Werten aus Naturmessungen und dem physikalischen Modellversuch überprüft, validiert und gezielt weiterentwickelt. Die hierfür benötigten experimentellen Daten werden zum Teil im Rahmen des hier beantragten Projekts ermittelt, zum Teil aus parallelen Teilprojekten und aus Kooperationen, sowie aus der Literatur und aus Vergabeleistungen zusammen gestellt. Die Weiterentwicklungen der Verfahren werden von Fremdleistungsnehmern als Vergabeleistung und durch die Projektmitarbeiter im Referat K2 betrieben.

### **3 Ergebnisse**

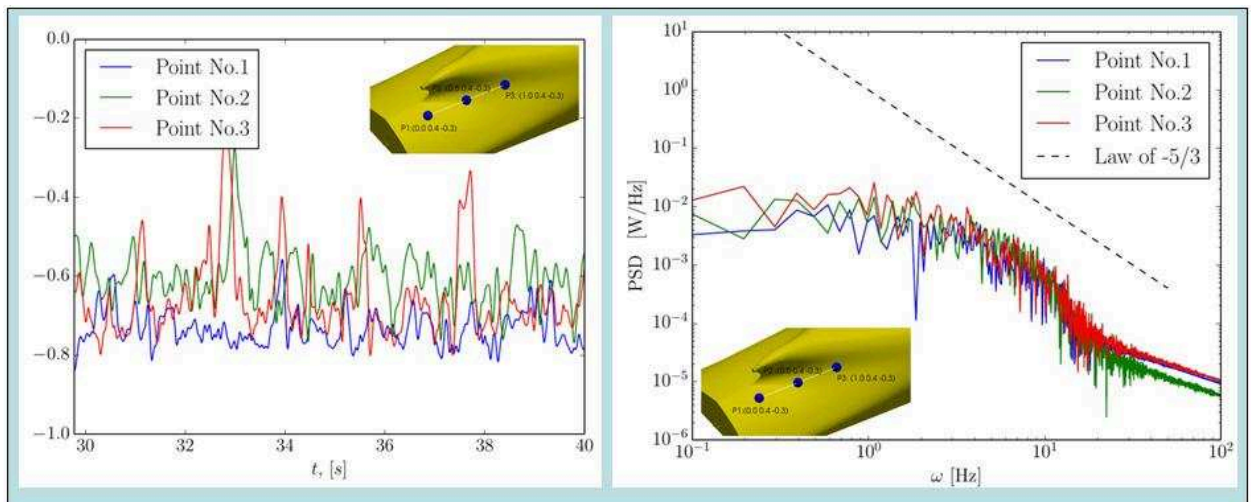
Im Berichtszeitraum lagen die Schwerpunkte der Untersuchungen auf der Umströmung des Rumpfs und der Spaltströmung zwischen Rumpf und Gewässersohle. Durch diese Analyse der Strömungsverhältnisse wird ein tiefer Einblick in die strömungsmechanischen Hintergründe, die zur Verstärkung des Trimmings bei sehr geringer Kieflreiheit und zur Belastung der Gewässersohle durch Schiffsverkehr führen gewonnen. Die numerischen Simulationen von Shevchuk am LeMoS (Universität Rostock) im



Auftrag der BAW zeigten deutlich die Bereiche, in denen Ablösung auftritt (Bild 1) und konnten einen Mechanismus der zu erhöhtem Trimm führt nachweisen. Eine weitergehende Analyse der auftretenden Frequenzen und der energietragenden Skalen der turbulenten Strömung im Modellmaßstab (Bild 2) schließen die numerischen Untersuchungen mit dem hybriden Löser ab. Die Ergebnisse werden auf der internationalen Konferenz MASHCON 2016 in Hamburg präsentiert.



**Bild 1:** Bereiche turbulenter Ablösung am Hinterschiff, Fahrt des Schiffs ist 1,08 m/s (12 kn in der Natur)



**Bild 2:** Numerisch bestimmte turbulente Schwankungen im Nachstrom des Schiffs

Ergänzend zu den numerischen Untersuchungen wurde ein Modellschiff gefertigt (Bild 3), das speziell so konstruiert wurde, dass ein optischer Durchgang durch den Boden des Rumpfs geschaffen wurde, mit dem Ziel durch Laser-Doppler-Anemometrie die Grenzschichtströmung in dem Spalt zwischen Rumpf und Boden experimentell zu untersuchen. Schwerpunkt der Messungen sind die auftretenden Geschwindigkeitsschwankungen und die turbulenten Frequenzen in der Grenzschicht am Rumpf und am Boden der Schlepprinne. Es wurde eine Serie von Kieffreiheiten und Geschwindigkeiten gewählt, um die in den numerischen Studien entdeckten verschiedenen Stadien der Vereinigung der Grenzschichten auf der Gewässersohle und am Boden des Schiffsrumpfs (siehe Jahresbericht 2014) aufzu-



um die in den numerischen Studien entdeckten verschiedenen Stadien der Vereinigung der Grenzschichten auf der Gewässersohle und am Boden des Schiffsrumpfs (siehe Jahresbericht 2014) aufzulösen und experimentell analysieren zu können. Die Messungen wurden über eine Woche im Dezember 2015 durchgeführt. Die umfangreichen Daten werden im Januar und Februar 2016 ausgewertet und stehen dann weitergehenden Untersuchungen und Fragestellungen zur Verfügung.



**Bild 3:** 14 Tsd. TEU Containerschiff (1:40) mit LDA-Geräten zur Strömungsmessung unter dem Rumpf.

Die Schleppversuche und LDA-Messungen wurden von der Schiffbauversuchsanstalt Potsdam (SVA) in der Flachwasser-Rinne des Entwicklungszentrums für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST) in Duisburg durchgeführt.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Im Bearbeitungsjahr 2015 wurde das Projekt beendet. Die zur Validierung benötigten Messungen mit freimanövrierenden Modellschiffen, die nach 2016 verschoben wurden, werden nicht im Zusammenhang mit diesem Projekt durchgeführt. Anfang 2016 erfolgt die Fertigstellung des begonnen Abschlussberichts.

Die für das Berichtsjahr geplanten Untersuchungen zu Windabschattungen und Windkräften auf Containerschiffen konnten nicht im Rahmen des Projekts durchgeführt werden. Sie werden auf Veranlassung im Rahmen von WSV-Aufträgen zur Schiffsführungssimulation der Revierfahrt, in denen diese Kräfte bedeutend sind und berücksichtigt werden müssen, nachgeholt.

Laufzeit des Vorhabens: 2010 bis 2016.

#### 5 Literatur

-/-

## 6 Veröffentlichungen

- Böttner, C.-U., Kastens, M. (2015): „Squat at very shallow water conditions and increased trim: Result of unsteady flow and united boundary layers under the ship's hull?“, MARINE2015, int. Conference, June 2015, Rome, Italy
- Shevchuk, I., Böttner, C.-U., Kornev, N. (2016): „NUMERICAL ANALYSIS OF THE FLOW IN THE GAP BETWEEN THE SHIP HULL AND THE FAIRWAY BOTTOM IN EXTREMELY SHALLOW WATER“, MASHCON2016, int. Conference, May 2016, Hamburg, Germany
- Böttner, C.-U. (2013): „Experimental Investigation of Squat of a 14000 TEU CS (Duisburg Test Case)“ Vortrag PreSquat International Workshop, 4. September 2013, Duisburg
- Böttner, C.-U. (2012): „Schiffshydrodynamik bei der Revierfahrt“ Vortrag jährliche Sitzung des Fachausschuss Hydrodynamik der STG, 28. September 2012, Hamburg

## **Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39550270141

**Projektleiter:** Dr.-Ing. K. Uliczka, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** klemens.uliczka@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, berät die für den Bereich der Küstenregionen zuständigen Wasser und Schifffahrtsämter (WSÄ) der Wasser und Schifffahrtsverwaltung (WSV) u.a. hinsichtlich Funktion und Stabilität von Strombauwerken an den Seeschiffahrtsstraßen (SeeSchStr) der Tideästuare, der Ostsee sowie dem Nord-Ostseekanal.

Schadensfälle an Leitwerken und Buhnen sowie Deckwerken an den Seeschiffahrtsstraßen aufgrund schiffserzeugter Belastungen wurden in der letzten Dekade verstärkt in der Außenweser sowie in der Unterelbe festgestellt. Für eine Abschätzung der schiffserzeugten, langperiodischen hydrodynamischen Belastung der Deckschichten als Basis für die Ermittlung der erforderlichen Steingrößen / -gewichte konnten nur vorhandene theoretische, fachlich nicht exakt zutreffende und nur bedingt gültige Ansätze verwendet werden (BAW, 2010). Hoch instationäre und turbulente hydrodynamische - zudem in Tideästuaren wasserstandsabhängige - schiffserzeugte Belastungen führen zu komplexen Untersuchungsaufgaben. Diese zeichnen sich aus durch eine hohe Zahl an zu erfassenden und physikalisch zu beschreibenden hydrodynamischen Parametern, verteilt über verschiedene zu bemessende Abschnitte von Leitdämmen und Buhnen einschließlich deren Anbindung an die Ufersicherungen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Aufgrund der weiterhin zunehmenden Größenentwicklung der Containerschifffahrt mit der Inbetriebnahme von 14.000 TEU-Containerschiffen in 2010 und von 19.100 TEU-Containerschiffen mit Längen von ca. 400 m und Breiten bis ca. 60 m in 2014 erhält die nachhaltige Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken und Ufersicherungen an den Seeschiffahrtsstraßen der Tideästuare bei der Kenntnis der bemessungsrelevanten Parameter der schiffserzeugten Belastungen eine wachsende Bedeutung. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Form von Bemessungshinweisen für Vorhabensträger der WSV an Seeschiffahrtsstraßen erarbeitet und von der BAW veröffentlicht. Die Dringlichkeit des FuE-Projekts ergibt sich aus der akut erforderlichen, fachgerechten und nachhaltigen Sanierung der Schadensfälle (z.B. Außenweser Langlütjennord und Unterelbe Juelssand).

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Dieses FuE-Projekt hat zum Ziel, fundierte Unterlagen für den Bereich der Seeschiffahrtsstraßen der WSV an Nord- und Ostsee zu erarbeiten, die eine fachlich abgesicherte und nachhaltige Bemessung auf die langperiodischen, schiffserzeugten Lastfälle durch Wellen und Strömung bzw. Überströmen ermöglichen. Dazu sind im Wesentlichen folgende Untersuchungsschwerpunkte zielführend:

- Grundsätzliche Erfassung der kurz- und langperiodischen schiffserzeugten physikalischen Prozesse im Nahbereich von Leitdämmen und Buhnen.
- Ableitung analytischer Ansätze zur nachhaltigen Bemessung von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen mit Bestimmung bemessungsrelevanter Parameter anhand von Messdaten.
- Aufbereitung abgesicherter Validierungsdaten für numerische Verfahren u.a. aus fachübergreifenden Forschungsgebieten der Geotechnik.
- Anwendung / ggf. Entwicklung hydrodynamisch-numerischer Verfahren zur schiffserzeugten Belastungssituationen von Deckschichten an Strombauwerken.
- Vergleichende Bewertung probabilistischer Bemessungsverfahren zum Einsatz in der WSV.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Projekts mit dem Leichtweiß Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig und dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen sind umfangreiche methodenübergreifende Untersuchungen an Seeschiffahrtsstraßen zur langperiodischen schiffserzeugten Belastungen im Nahbereich von Leitdämmen und Buhnen wie u.a. das Prüfen von vorhandenen empirisch-analytischen Ansätzen, klein- und ggf. großmaßstäbliche 2D und 3D-Untersuchungen, hydrodynamisch-numerische Simulation, Monitoring in der Natur sowie die Erarbeitung von probabilistischen Bemessungsansätzen parallel zur deterministischen Bemessung vorgesehen. Des Weiteren sind hinsichtlich einer ganzheitlichen Betrachtung der Aufgabenstellung enge projektübergreifende Kontakte mit dem FuE-Projekt A39550170270 der BAW aus dem Fachgebiet Geotechnik vorgesehen.

## 3 Ergebnisse

Nach der in 2012 abgeschlossenen Schadensanalyse (Arbeitspaket AP1; BAW, 2012) liegen die Berichte der Prozess- und Wissensstandsanalyse (AP2; IWW, 2012), der Parametrisierung von gemessenen Schiffswellen in Modell und Natur (AP3; LWI, 2012), zu den kleinmaßstäblichen 2D-Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität (AP4; IWW, 2013) sowie zur Entwicklung eines 3D-CFD/CSD-Modells und numerische Stabilitätsuntersuchungen (AP5; LWI, 2013) vor. Nach Vorversuchen in 2015 (IWW, 2015) wurden weitergehende Stabilitätsuntersuchungen zum AP4-M3 im Modellmaßstab 1:7,5 hinsichtlich der langperiodischen dynamischen Wellenbelastung für 2015 / 2016 am IWW der RWTH Aachen beauftragt. Der Forschungsbericht zu den im AP4b (Kleinmaßstäbliche 3D-Untersuchungen zu alternativen Buhnsystemen) vorgenommenen dreidimensionalen Modellversuche (Maßstab 1:40) wurden in 2015 vorgelegt (BAW, 2015).



Bild 1: Längsansicht des Überströmvorgangs am Strombauwerk infolge der Schwallwellen-Randbedingung (Numerische systemstudien; aus IWW, 2015)

Bei den numerischen Vorversuchen zur wasserbaulichen Simulation einer langperiodischen Primärwelle im zweidimensionalen Kanal des IWW wurden sinusförmige und Schwallwellen-Randbedingungen untersucht.

Bei der in Bild 1 dargestellten numerischen Simulation des IWW handelt es sich bei der Schwallwellen-Randbedingung um eine brechende Welle am Bauwerk. Gezeigt wird die Verteilung des Wasservolumens im Bereich des Strombauwerks zu den Zeitpunkten  $T = 10 - 11,75$  sec in einer Kanallängsansicht. Der Wellenfront läuft eine turbulente Phase in Form eines Luft-Wasser-Gemischs voraus, was sich an den nur teilweise mit Wasser gefüllten Zellen erkennen lässt (lila Färbung).

Auf Basis der numerischen Systemstudien wird empfohlen, im Strömungskanal des IWW als Randbedingung nach derzeitigen Erkenntnissen die Schwallwellen-Randbedingung zu verwenden, die dann hinsichtlich ihrer Höhe und Dauer zu variieren ist (nach IWW, 2015).

Die Umsetzung erfolgte 2015, so dass in 2016 die Modellversuche vorgenommen werden können.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Modellphase 3 des AP4 (2D-Kleinmaßstäbliche Stabilitätsuntersuchungen – Langperiodische dynamische Belastung) wurde an das Institut IWW für 2015/2016 vergeben. Die Vergabe von Teilaufgaben zum Monitoring von Stabilitätsversuchen in der Natur an die Hochschule HafenCity-Universität Hamburg (HCU) ist erfolgt und wird Ende 2016 abgeschlossen. Das bisher geplante, noch abzuarbeitende Arbeitspaket zur „Bewertung probabilistischer Bemessungsverfahren“ wird voraussichtlich nicht in diesem FuE-Projekt abgeschlossen werden können, da bis Ende 2016 die Datengrundlage noch nicht erarbeitet sein wird. Es wird empfohlen dieses Arbeitspaket in einem FuE-Folgeprojekt zu bearbeiten.

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2018 (beantragt).

#### 5 Literatur

- BAW (2010): Bemessung der Strombauwerke in der Außenweser unter Berücksichtigung von Schiffswellenbelastungen. Gutachten BAW-Nr. A39550210120, Hamburg (*unveröffentlicht*)
- BAW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP1 – Schadensanalyse. BAW-Nr. A39550270141, Hamburg (*unveröffentlicht*)
- IWW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP2 – Wissensstandsanalyse der an der Wellen-Strombauwerk-Interaktion beteiligten Belastungsprozesse. RWTH Aachen (*unveröffentlicht*)
- IWW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP4 – Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität (Zwischenbericht 2013), RWTH Aachen (*unveröffentlicht*)
- LWI (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP3 – Bestimmung der bemessungsrelevanten Parameter schiffserzeugter Wellen in SeeSchStr (Parametrisierung der Schiffswellen. TU Braunschweig (*unveröffentlicht*)
- IWW (2013): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP4 – Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität, RWTH Aachen (*unveröffentlicht*)
- LWI (2013): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP5 – Entwicklung eines 3D-CFD/CSD-Modells und numerische Stabilitätsuntersuchungen (Numerische Simulation). TU Braunschweig (*unveröffentlicht*)
- BAW (2015): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen - Arbeitspaket 4b Kleinmaßstäbliche 3D-Untersuchungen zu alternativen Buhnensystemen, BAW-Nr. A39550270141, Hamburg (*unveröffentlicht*)

IWW (2015): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen AP4a – Vorversuche zur Modellphase 3, RWTH Aachen (*unveröffentlicht*)

## **6 Veröffentlichungen**

Uliczka, K. (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – FuE-Kooperation von LWI (TU BS) / IWW (RWTH) / HPA / BAW. BAW-Kolloquium 21.09.2012, Hamburg

Krebs, V.; Wöffler, T.; Uliczka, K.; Schüttrumpf, H. (2015): Numerische Simulationen zur Erzeugung langperiodischer Wellen, Hafentechnische Gesellschaft, HTG-Kongress 2015, Bremen

Uliczka, K.; Gätje, B. (2015): Pilotprojekt zur Stabilität von optimierten Strombauwerken im Unterelbeabschnitt Juelssand, BAW-Kolloquium, Hamburg

## **Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen**

**Netzplan-Nr.:** A39550270142

**Projektleiter:** Dr.-Ing. K. Uliczka, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. (FH) B. Kondziella, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** klemens.uliczka@baw.de; bernhard.kondziella@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Im Rahmen der Betrachtung des tidebedingten Sediment- und Schwebstofftransports in den Seeschiffahrtsstraßen und der verstärkten Sedimentation in den anliegenden Hafenanlagen der Ästuar nach den vergangenen Ausbaumaßnahmen der Fahrrinnen stellte sich vermehrt in den letzten 10 Jahren die Frage nach dem Anteil von Schiffspassagen der immer größer werdenden Fahrzeuge am residuellen Sedimenttransport.

Nach einer ersten Schriftumsrecherche ist festzustellen, dass der schiffserzeugte Sedimenttransport zum einen hinsichtlich der Resuspension oder Erosion von Uferzonen in Binnengewässern oder an Küstenstreifen durch schiffserzeugte Wellensysteme untersucht wurde. Des Weiteren wurden die schiffserzeugte Suspensionserhöhung integral im Gewässerquerschnitt im Vergleich zu natürlich induzierten Werten abgeschätzt, hauptsächlich aber Binnengewässer und Flüsse bei Passagen von Schubschiffen, Küstenmotorschiffen oder kleineren Schiffseinheiten wie auch Sportbooten untersucht. Darüber hinaus wurden einfache analytische Ansätze entwickelt, mathematische Modellierungen eingesetzt und verglichen sowie z.B. hinsichtlich der Auswirkungen des Propellerstrahls vorhandene Ansätze auf der Basis neuer numerischer Modelle und Messungen in der Natur überprüft.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Aufgrund der weiterhin zunehmenden Größenentwicklung der Containerschiffahrt (Inbetriebnahme von 19.100 TEU-Containerschiffen in 2014) und der erneut geplanten Anpassung der Fahrrinnen der Seeschiffahrtsstraßen an die Containerschiffahrt erhält die Kenntnis des schiffserzeugten Sedimenttransports als Teil des Sedimentregimes der Tideästuar eine wachsende Bedeutung. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen im Rahmen von Strombau- und Sedimentmanagementkonzepten der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung (WSV) für die Seeschiffahrtsstraßen berücksichtigt werden. Grundsätzlich werden mit entsprechendem Vorlauf die betroffenen Ämter der WSV sowie die zuständigen Lotsenbrüderschaften in das Vorhaben eingebunden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Die wesentlichen, abschnittsunabhängigen Ziele der Untersuchungen für die Seeschiffahrtsstraßen sind:

- Grundsätzliche Erfassung des schiffserzeugten Sedimenttransports (SeST) mit u.a. instationärer schiffserzeugter Wasserspiegeländerung, instationärer schiffserzeugter Strömung in Betrag, Richtung und Verteilung, Turbulenzmaß und -ausbreitung, Suspensionskonzentration und deren vertikale/horizontale Verteilung, Sedimentologie des Gewässerbetts, lokale Sohl- und Böschungsänderungen sowie relevante Daten der Schiffe und deren Passagen.
- Differenzierung des SeST, räumlich und prozessorientiert: Im Nahfeld des Schiffs mit dessen Anteilen, bewirkt durch die Verdrängungsströmung, durch strömungsinduzierte Druckänderung, durch den Propellerstrahl und/oder Nachstrom. Im Fernfeld mit den Anteilen aus Verdrängungsströmung, welleninduzierter Orbitalströmung. Im ufernahen Bereich mit Anteilen aus Verdrängungsströmung, welleninduzierter Orbitalströmung, welleninduzierter Druckänderung/Turbulenz und Wellenumformungsprozessen.
- Entwicklung empirisch-analytischer Ansätze zur Abschätzung des SeST in Seeschiffahrtsstraßen für das Nahfeld, das Fernfeld sowie die Uferzone sowie
- Ermittlung des Anteils des SeST am Gesamttransport in einem Tideästuar.

## 2 Untersuchungsmethoden

Aufgrund der Abhängigkeit der tidebedingten und schiffserzeugten physikalischen Prozesse, die den SeST in einer Seeschiffahrtsstraße beeinflussen, können nur Messungen in der Natur über die Wirkzusammenhänge Aufschluss geben. Zur ganzheitlichen Betrachtung sind SeST-Messungen im Nah- und Fernfeld sowie in der Uferzone vorgesehen. Dazu sind neben einer vertieften Prozess- und Wissensstandsanalyse (AP1) verschiedenste Arbeitspakete erforderlich, die u.a. unter den folgenden Aspekten abgearbeitet werden. Im AP2 der BAW wurden in 2012 Messungen, u.a. als Erprobung von Verfahren, unter kontrollierten Bedingungen bei geringem „Grundrauschen“ in der Seeschiffahrtsstraße Nordostsee-Kanal (NOK) vorgenommen, um dann mit den geprüften Messverfahren in einem weiteren Schritt weitere Messkampagnen unter Tidebedingungen fortzuführen. Verschiedene Messverfahren wie u.a. stationäre ADCP-Messungen, instationäre ADCP- und SES-Messungen mit begleitender Probenentnahme und weitere Systeme wie z.B. Fächersonarsysteme waren bei der Messkampagne am NOK in 2012 zu erproben und auf ihre Einsatztauglichkeit für die Messaufgabe zu überprüfen. Die Messergebnisse der Hydrodynamik sowie des bereichsweisen schiffserzeugten Sedimenttransports sind prozessorientiert zu analysieren, als empirisch/analytische Ansätze zu formulieren und hinsichtlich des Genauigkeitsmaßes sowie der Gültigkeitsgrenzen zu betrachten.

Die in der Natur erfassten hydrodynamischen Prozesse bei der Umströmung eines Schiffs bei Revierfahrt werden zudem als weitere Validierungsdaten in dem laufenden FuE-Projekt Schiffshydrodynamik in Flachwasser SHD-F (BAW-Nr. A39550270133) verwendet.

## 3 Ergebnisse

Um einen Einblick in die Vielfalt der Verhältnisse in der Wassersäule nach der Passage eines Schiffs zu erhalten, waren im AP2 stichprobenartig über einen längeren Zeitraum zeitlich und räumlich hochauflösende (Sonar-) Profilmessungen zur Erfassung der akustischen Signatur des Nachstroms im Nahfeld eines passierenden Seeschiffs sowohl in der Tideelbe bei Wedel als auch im Nordostsee-Kanal vorgenommen worden (HCU, 2011; HCU, 2012).

An der im Rahmen des AP2 vorgenommene Messkampagne am NOK im September 2012 waren neben der BAW der Partner AquaVision, Utrecht, NL sowie der ABz. Hochdonn des WSA Brunsbüttel beteiligt. Die umfangreichen Ergebnisse wurden nach fachlich relevanten Kriterien dokumentiert und an sohnahen Einzelpositionen, im Vertikalprofil sowie im Gewässerquerschnitt ausgewertet und untereinander abgeglichen. Zur Verdeutlichung der Schwierigkeiten bei der Zuordnung der Rückstreuungssignale (Sediment oder akustische Störung) bei der Analyse der ADCP-Querprofilfahrten unmittelbar im Nachstrom eines Fahrzeugs wurde beispielhaft eine der Ergebnisdarstellungen aufbereitet und bewertet. Erste Analysen der BAW wurden 2013 vorgestellt (Uliczka und Kondziella, 2013) und erste Zusammenhänge aufgezeigt.

Für weitergehende Analysen der aufbereiteten Messdaten aus dem NOK wurde mit der Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Wasserbau & Hydromechanik, ein Kooperationsrahmenvertrag über die wissenschaftliche Zusammenarbeit auf dem Fachgebiet SeST an SeeSchStr vereinbart. Der abgestimmte Forschungsumfang für 2014 beinhaltete u.a. weitergehende statistische Analysen von Messdaten sowie die Prüfung vorhandener Ansätze zum SeST auf deren Erweiterungsmöglichkeiten. Die bisherigen Ergebnisse anhand der Daten aus dem NOK wurden in Zwischenberichten zusammengestellt (UNI Siegen, fwu, 2014, UNI Siegen - fwu, 2015).

Zur Parametrisierung der sohnahen, schiffserzeugten Trübungsverläufe wurden u.a. Kozeny-Funktionen gewählt, die - exemplarisch für zwei Ereignisse in Bild 1 dargestellt - den entsprechenden Anstieg und Abfall des jeweiligen gemessenen schiffserzeugten Trübungsverlaufs in Sohnähe hinreichend gut beschreiben (nach UNI Siegen - fwu, 2015).



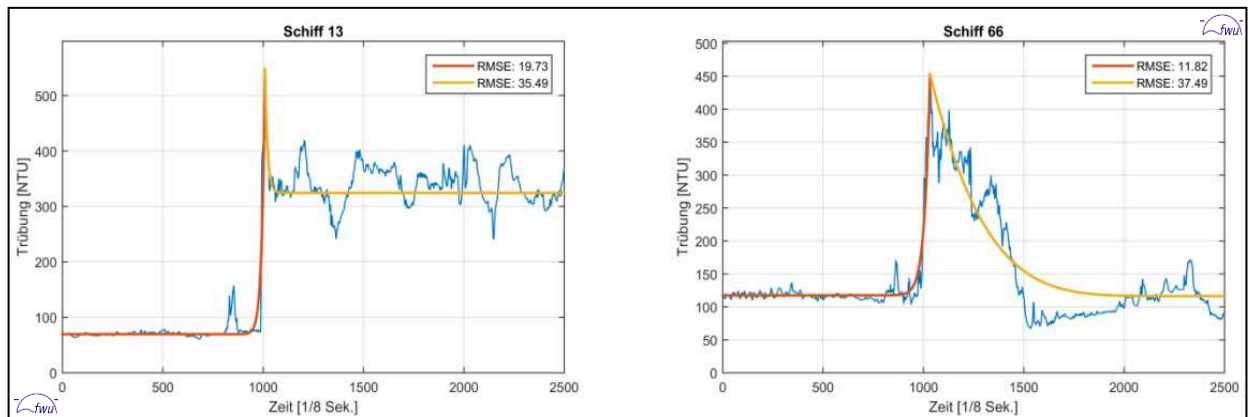


Bild 1: Anpassung und Anpassungsgüte (RMSE) von Kozeny-Funktionen an die Trübungsverläufe zwei verschiedener Schiffspassagen (aus UNI Siegen – fwu, 2015)

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die umfangreichen Messdaten der BAW und des Partners AquaVision am NOK von 2012 sowie weitere Daten aus deren Messprogramm Tideelbe vom Oktober 2015 werden aufbereitet und ausgewertet. Im Rahmen des FuE-Kooperationsrahmenvertrags mit dem fwu der Universität Siegen werden darüber hinaus in 2016 die aufbereiteten Daten anhand der bereits entwickelten Verfahren analysiert und zur Validierung entwickelter Ansätze hinzugezogen.

Laufzeit des Vorhabens: 2011 bis 2016.

#### 5 Literatur

- AquaVision (2012): Suspended sediment measurements in the Nord-Ostsee-Kanal. AquaVision BV, Utrecht, The Netherlands (in Englisch; *unveröffentlicht*)
- Universität Siegen, fwu (2014): Schiffserzeugter Sedimenttransport an Seeschiffahrtsstraßen – Zwischenbericht 11/14 zum Forschungsumfang 2014, Siegen (*unveröffentlicht*)
- Universität Siegen, fwu (2015): Schiffserzeugter Sedimenttransport an Seeschiffahrtsstraßen (SeST) – Validierung entwickelter Ansätze – Zwischenbericht 2 – 11/2015, Siegen (*unveröffentlicht*)

#### 6 Veröffentlichungen

- Jensen, J.; Kelln, V.; Niehüser, S.; Arns, A.; Uliczka, K.; Kondziella, B. (2015): Entwicklung empirisch analytischer Ansätze als Proxy für schiffserzeugten Sedimenttransport an Seeschiffahrtsstraßen. Hafentechnische Gesellschaft, HTG-Kongress 2015, Bremen
- Kondziella, B., Böder, V., Prokoph, A., Sauer, A. (2013): Forschung und Entwicklung zum schiffserzeugten Sedimenttransport (SeST) im NOK und in der Elbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Tagungsband BfG-Kolloquium 11/29012: Neue Entwicklungen in der Gewässervermessung, Koblenz 5/2013 - ISSN 1866 – 220X, [http://doi.bafg.de/BfG/2013/Veranst5\\_2013.pdf](http://doi.bafg.de/BfG/2013/Veranst5_2013.pdf)
- Uliczka, K., Kondziella, B. (2013): Auswirkungen der Schiffsgrößenentwicklung auf Seeschiffahrtsstraßen. Vortrag und Kurzfassung, BAW-Kolloquium 19.09.2013: Projekte und Entwicklungen für aktuelle Fragestellungen im Küstenwasserbau, Hamburg

## **Berücksichtigung von beweglichen oder fixen Strukturen (Schiffe) an der freien Wasseroberfläche im hydrodynamisch numerischen Modell UnTRIM**

**Netzplan-Nr.:** A39550270149

**Projektleiter:** M. Kastens, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** marko.kastens@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

In dem Forschungsprojekt der BAW soll geklärt werden, welchen Einfluss Schiffe auf die Hydrodynamik und damit schließlich auch auf den Sedimenttransport z.B. eines Tideästuars haben. Da sich die komplexen natürlichen Prozesse im Ästuar mit denen der Wechselwirkung eines Seeschiffs mit seiner Seeschiffahrtsstraße überlagern, liegt die Anwendung eines mathematischen Simulationsmodells nahe, um die Anteile der Veränderung der Hydrodynamik durch ein oder mehrere Schiffe zu quantifizieren.

Das mathematische Verfahren UnTRIM ermöglicht die numerische Simulation vieler für das Tidegebiet bedeutsamer physikalischer Prozesse. Hierzu zählen u. a. die Ausbreitung der Tidewelle, der Wechsel von Ebbe- und Flutstrom, der Transport von Salz, Wärme und Schwebstoffen im Wasserkörper. Die derzeit aktuellste Version von UnTRIM (UnTRIM<sup>2</sup>, siehe FuE-Projekt UnTRIM-Subgrid Topographie, A39550370150) kann zusätzlich höhere als durch das Berechnungsnetz aufgelöste Informationen der Bathymetrie an der Gewässersohle verarbeiten (SubGrid-Technologie).

Noch nicht möglich ist zurzeit eine Be-/Einschränkung der freien Wasseroberfläche durch feste und/oder bewegliche Strukturen, wie beispielsweise Schiffe oder von z.B. oben eintauchende Sperrwerkstore - im Folgenden allgemein Verblockung der Wasseroberfläche genannt.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die gutachterliche Beratung der WSV ist die zentrale Kernaufgabe der BAW. Zur Unterstützung der gutachterlichen Aussagen kommen sehr häufig hydrodynamische numerische Modelle zum Einsatz. In der BAW in Hamburg ist das mathematische HN-Verfahren UnTRIM das meistgenutzte Werkzeug.

Mit zunehmender Häufigkeit wird von den Ämtern der WSV der Einfluss von Schiffen auf die Hydrodynamik und den Sedimenttransport nachgefragt (siehe dazu auch das FuE-Projekt Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen, A39550270142). Die Berücksichtigung der oben beschriebenen Verblockungen der freien Wasseroberfläche in dem HN-Verfahren UnTRIM eröffnet die Möglichkeit, den Einfluss von Schiffen auf die Hydrodynamik in einer ersten Näherung zu ermitteln.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Untersuchungsziel ist die Berechnung der veränderten Hydrodynamik aufgrund der Querschnittsverblockung an der freien Wasseroberfläche durch ein Schiff.

Dazu soll im HN-Modell UnTRIM die SubGrid-Technologie auf die freie Wasseroberfläche übertragen werden, so dass eine dynamische Verblockung der Wasseroberfläche im Modell als eine weitere Randbedingung mit berücksichtigt werden kann.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Erweiterung des HN-Modells UnTRIM (Programmierung) und numerische Modellierung mit dem HN-Modell UnTRIM.

### 3 Ergebnisse

Durch die zusätzliche Randbedingung einer verblockten oder gespannten Oberfläche, wurde es nötig einen Lösungsalgorithmus zu entwickeln, der der zusätzlichen Randbedingung Rechnung trägt und trotzdem Lösungen findet, die robust sind. CASULLI & ZANOLLI (2012) haben einen solchen Algorithmus aufgestellt und dokumentiert.

Dieser Algorithmus wurde ebenfalls von CASULLI an der Universität Trient in den Programmcode UnTRIM<sup>2</sup> implementiert und getestet. UnTRIM<sup>2</sup> beinhaltet bereits die SubGrid-Technologie (CASULLI & STELLING, 2011), mit der auch Topographiedetails, die kleiner sind als die Diskretisierung des Berechnungsgitters berücksichtigt werden können.

Ferner wurde ein Rahmenmodul in Fortran 95 entworfen, programmiert und getestet, dass als Benutzer-Schnittstelle für die Berücksichtigung von oben eingetauchten Hindernissen (Schiffen) im Modell UnTRIM<sup>2</sup> dient. Dieses Modul bedient den UnTRIM<sup>2</sup>-Kern mit dem Setzen der Randbedingung für die gespannte Oberfläche. Es wurde in seiner jetzigen Funktionalität getestet, muss zukünftig jedoch noch weiter entwickelt werden.

Nach dem erfolgreichen Abschluss erster Plausibilitätstests wurden im weiteren Projektverlauf unphysikalische Phänomene in Form von starken Wellenartefakten entdeckt. Vor der weiteren Entwicklung mussten die Gründe und Abhängigkeiten, die zu diesen Artefakten führen untersucht werden. Umfangreiche Systemstudien und Sensitivitätstests wurden durchgeführt, um Herkunft und Zusammenhänge dieses Problems zu ermitteln. Es konnten Wertebereiche diverser Parameter ermittelt werden, bei deren Verwendung es nicht zu Wellenartefakten hinter dem eingetauchten Körper kommt.

Für eine gute Abbildung der Schiffshülle im Subgrid-Gitter wurden diverse Arbeitsabläufe entwickelt und erprobt. Die Module zur Integration einer höher aufgelösten Schiffshülle wurden erweitert und angepasst. Zum aktuellen Zeitpunkt sind diese Arbeiten noch nicht abgeschlossen; die Schiffshülle wird im Subgrid-Gitter noch nicht wie gewünscht abgebildet. Weitere Arbeiten sind notwendig.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

#### **Arbeitspaket 1:** Softwareentwicklung, Implementierung und Plausibilitätstests des HN-Modells UnTRIM

Die Entwicklung soll folgende Bedingungen/Annahmen erfüllen:

- Die Hülle des Schiffes soll grob wiedergegeben werden (z.B. der Bugwulst muss nicht mit abgebildet werden) - die Auflösung des Schiffes hat dieselbe Subgrid-Auflösung wie die Bathymetrie unter dem Schiff (gleiche Struktur und Größe)
- Um die Berechnungsgeschwindigkeiten praktikabel beizubehalten wird Hydrostatik vorausgesetzt
- Der Fokus liegt auf langen Wellen. Kurzperiodische Wellen werden nicht betrachtet.
- Die Kräfte auf das Schiff und die daraus resultierende Lageveränderung des Schiffes werden nicht berechnet (Squat und Trimm)
- In einer ersten Version wird der Schiffskörper statisch an einer Position im Modellgebiet positioniert
- Plausibilitätstests

#### **Arbeitspaket 2:** Softwareentwicklung, Implementierung und Plausibilitätstests des HN-Modells UnTRIM

Die Entwicklung soll folgende Bedingungen/Annahmen erfüllen:

- Der Schiffskörper wird über eine durch externe Daten beschriebene Bahn durch das Wasser geführt
- Diese externen Daten beschreiben die Position, den Tiefgang, den Kurs und die Geschwindigkeit über Grund
- Plausibilitätstests

**Arbeitspaket 3:** Schnittstellen, Analysen, Visualisierungen und Validierung

- Literaturrecherche
- Entwicklung von eigenen Datenformaten oder Bereitstellung von Schnittstellen schon verfügbarer Datenformate
  - der Schiffshülle für die Simulation
  - der Schiffsposition, Kurs sowie der Geschwindigkeit
- Schnittstellen zur Datenausgabe von UnTRIM (Schnittprofile und Nahfeldergebnisse)
- Visualisierung und Darstellung (von z.B. Schiffspassagen)
- Parameteranalyse (Wasserstand, Strömung, ...)
- Plausibilitätstests
- Validierungen
- Benchmarks
- Dokumentation
- Anforderungsanalyse zur Erweiterung der vorhandenen Post-Prozessoren Software (Tidekennwertanalyse, Darstellungssoftware, ...)

**Arbeitspaket 4:** Validierung der Methode mit Naturmessdaten aus dem FuE-Projekt Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen

**Zeitplan:**

Aufgrund der Dringlichkeit von anderen Projekten konnte nicht die geplante Zeit in das Projekt investiert werden. Dieser Umstand zusammen mit den oben erwähnten Problemen führte dazu, dass nicht alle Arbeitspakete abgeschlossen werden konnten, z. B. Arbeitspakete 2, 3 und 4. Das Projekt wird im derzeitigen Zustand dokumentiert und in 2016 beendet. Die Arbeiten können in einem neuen FuE-Projekt wieder aufgenommen und fortgeführt werden.

Arbeitspaket 1 (abgeschlossen)

Arbeitspaket 2 (nicht abgeschlossen)

Arbeitspaket 3 (nicht abgeschlossen)

Arbeitspaket 4 (nicht abgeschlossen)

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2015.

## 5 Literatur

Casulli, V. & Stelling, Guus S. (2011): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Volume 67, Issue 4, Pages 441-449, 10.1002/flid.2361

Casulli, V. & Zanolli, P. (2012): Iterative solutions of mildly nonlinear systems, Journal of Computational and Applied Mathematics, Volume 236, Issue 16, Pages 3937-3947, 10.1016/j.cam.2012.02.042.

## 6 Veröffentlichungen

Kastens, M. (2013): First application of the new ceiling boundary condition and further outlook; Vortrag auf dem Untrim Users Meeting 2013, Prof. Casulli, Universität Trient, Italien, 27.-29.5.2013

Kastens, M. (2013): Einsatz numerischer Methoden für die Fachaufgabe Schiff – Wasserstraße; Vortrag im Rahmen des BAW-Kolloquiums, Hamburg, 19.9.2013

## **Feststofftransport in Ästuaren**

**Netzplan-Nr.:** A39550270150

**Projektleiter:** Dipl. Ing. (FH) Ch. Maushake, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme I (K2)

**Bearbeiter:** Dr. rer. nat. S. Grünler, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** christian.maushake@baw.de, steffen.gruenler@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Das Verständnis der räumlichen und zeitlichen Veränderung der Hydrodynamik, des Sedimenttransports und der Morphodynamik ist von zentraler Bedeutung für die Unterhaltung von Gewässern als auch für Prognosen der physikalischen Gewässereigenschaften in der Zukunft. Um die in der BAW eingesetzten numerischen Modell- und Berechnungsverfahren kalibrieren und validieren zu können, spielen die Messungen von geophysikalischen Gewässerparametern eine wichtige Rolle. Daraus lassen sich folgende Verwendungszwecke ableiten:

Erfassung von geophysikalischen Gewässergrößen und ästuarspezifischen Eigenschaften für die Validierung von numerischen Modellen bezüglich:

- Tidedynamik
    - max. Strömungsgeschwindigkeiten
    - Durchflussmengen
    - Strömungsverteilung
  - Residuelle Transporte
    - Schwebstoffgehalte
    - Durchfluss
  - Lage und Dynamik der Trübungszone
  - Schichtenaufbau in der Bodengrenzschicht
  - Großräumige Morphologie (Bodenformen)
- Entwicklung einer geeigneten Datenschnittstelle, um Naturmessdaten in einem einheitlichen (quasi-) standardisierten Format für Zwecke der Modellvalidierung und des Datenaustausches zur Verfügung stellen zu können
    - Aufbau eines reproduzierbaren Workflows von der Datenaufnahme, Prozessierung bis zur einheitlichen Datenablage
    - Definition und Aufbau einer international anerkannten Datenschnittstelle für komplexe Naturmessdaten, einschließlich Metadaten
  - Analyse hydrologischer und sedimentologischer Teilprozesse in den Tideästuaren und Küstengewässern:
    - Turbulenz, insbesondere in der bodennahen Schicht
    - Sinkgeschwindigkeiten der Feststoffe in der Wassersäule in charakteristischen Tidephasen
    - Flüssigschlickdynamik, insbesondere Dynamik der Lutokline
    - Zusammenhang zwischen Fluid-Dichten (bulk density) und Feststoffkonzentrationen
    - Bodenformen und sohnaher Sedimenttransport
- Schwebstoffdynamik und Flokkulationsprozesse in der Wassersäule

Die BAW verfügt über eine ganze Reihe an geeigneten Datensätzen aus Naturmessungen der drei deutschen Hauptästuare (Elbe, Weser, Ems), die hinsichtlich der oben genannten Verwendungszwecke weitergehend zu analysieren sind. Die Validierung der numerischen Modellsysteme ist unabdingbar für das Verständnis der Ästuardynamik und für die Prognosen möglicher naturräumlicher und anthropogener Veränderungen. Die verfügbaren Datensätze aus den Naturuntersuchungen müssen für die Validierung vertieft wissenschaftlich evaluiert werden. Nur so lassen sich aus den Naturmessungen geophysikalische Prozesse studieren, die später zur Weiterentwicklung und Qualitätssicherung der numerischen Modellsimulationen genutzt werden können. Ferner sollen durch wissenschaft-

liche Analysen der vorhandenen Datensätze fachlich gesicherte Vorgehensweisen erarbeitet werden. Da für einige Teilprozesse wie „Sinkgeschwindigkeiten“ und „Flüssigschlickdynamik“ bisher nur eine unzureichende Datengrundlage besteht, sollen aus den Analysen geeigneten Messverfahren abgeleitet und entwickelt werden.

## 1.2 Bedeutung für die WSV

Neben dem weiteren Verständnis der Ästuardynamik stellen die aus den Analysen gewonnenen Erkenntnisse einen elementaren Bestandteil für die Validierung und Weiterentwicklung der numerischen Modellsysteme dar. Die Expertise der Modellierung der langfristigen Feststofftransporte ist im Hinblick für die geplanten Ausbauvorhaben der Seeschifffahrtsstraßen (zurzeit: Elbe, Weser, Ems) von großer Bedeutung. Die Prognose der Feststofftransporte z.B. für Fragen des Sedimentmanagements stellt eine zentrale Aufgabe im Rahmen der gutachterlichen Tätigkeit der BAW gegenüber der WSV dar. Die Validierung und Qualitätssicherung der Berechnungsergebnisse ist ohne robuste in-situ-Daten aus Naturuntersuchungen in planrechtlichen Verfahren nicht mehr darstellbar. Damit sind die im Abschnitt 1.1 genannten Mess- und Analyseverfahren von unverzichtbarer Bedeutung für die fachlich gesicherte Aufgabenerfüllung der BAW und für die WSV.

## 1.3 Untersuchungsziel

Ziel des Forschungsprojektes ist die Validierung und Weiterentwicklung der bei der BAW eingesetzten in-situ Methoden zur Untersuchung der Feststoffdynamik und der Austauschprozesse in der Bodengrenzschicht in den Hauptästuaren der Deutschen Bucht (Elbe, Weser, Ems) mit folgenden Teilaufgaben:

- Generierung von Validierungsdaten für die numerische Modellierung
  - Konvertierung akustischer Rückstreuintensitäten in Schwebstoffkonzentrationen aus ADCP-Messungen
  - Analyse der einzusetzenden akustischen Frequenzen (z.B. 300, 600 kHz)
  - Vergleich und Bewertung der Ergebnisse aus akustischen (ADCP, ADV) und optischen Messungen (OBS, LISST)
  - Korrelationsbetrachtungen der gefundenen Schwebstoffbilanzen mit Korngrößenanalysen und Dichteprofilen, sowie der hydrologischen Randbedingungen
  - Ästuarübergreifender Vergleich der Ergebnisse
- Definition und Aufbau einer geeigneten Datenschnittstelle, die den international üblichen Standards zum Austausch komplexer (Naturmess) -Daten entspricht, einschließlich Metadaten.
- Entwicklung und Test von Beobachtungskonzepten, um vorhandene Lücken bei der Beschreibung physikalischer Teilprozesse zu schließen:
  - Fließgeschwindigkeiten in hochkonzentrierten Suspensionen
  - Untersuchungen zur Beschreibung der Lutokline (dynamisch)
  - In-situ Erfassung von Sinkgeschwindigkeiten
  - Weitere Entwicklung bzw. Erprobung von Methoden zur Beobachtung der Charakteristik von Schwebstoffen und der Flockendynamik

## 2 Untersuchungsmethoden

Die in der BAW umfangreich verfügbaren Naturmessdaten konnten hinsichtlich der forschungsrelevanten Größen erst in Ansätzen untersucht werden (AquaVision 2009-2011). Zunächst werden vorhandene wissenschaftliche Analysemethoden eingesetzt (AP1-3), um daraus Konzepte für die weitergehenden Untersuchungen (AP4-5) abzuleiten.

## 3 Ergebnisse

Die vertiefte Analyse eines dreijährigen Messprogramms zur Erfassung der Schwebstoffdynamik in den drei Hauptästuaren der Deutschen Bucht (Elbe, Weser, Ems) aus den Jahren 2009 bis 2011 konnte abgeschlossen werden. Für die Validierung der numerischen Simulationsmodelle liegt nun ein

vollständig dokumentierter Datensatz, einschließlich Metadaten in dem international standardisierten Austauschformat NetCDF vor. Dieses Datenformat ist im Rahmen des FuE - Vorhabens an den Sonderfall der ADCP-Querschnittsmessungen angepasst worden. Damit können Daten aus der numerischen Simulation und aus Naturmessungen erstmalig in einer einheitlichen Datenschnittstelle analysiert und verglichen werden. In ersten, projektübergreifenden Arbeiten wurden diese Entwicklungen im Rahmen des FuE-Vorhabens MorphoWeser (Netzplan-Nr.: A39550270223) zur Modellvalidierung über die räumliche und zeitliche Verteilung suspendierter Sedimente in der Trübungszone der Weser eingesetzt (vgl. Veröffentlichung Zorndt, A. et al. 2015).

Darüber hinaus ist das FuE-Vorhaben eng verknüpft mit einer langjährigen Forschungskooperation mit dem Zentrum für marine Umweltwissenschaften (Marum) der Universität Bremen. In diesem Zusammenhang werden zurzeit Messkonzepte für hyperturbide Bereiche (vor allem: Unterems) entwickelt und getestet. Im Rahmen dieser Forschungskooperation, als auch im Rahmen der Projektbearbeitung für die WSV (u.a. Aktionprogramm Ems, Netzplan A39550310143) sind in 2015 umfangreiche Naturuntersuchungen durchgeführt worden, in die die Ergebnisse aus diesem FuE-Vorhaben direkt einfließen.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das FuE-Vorhaben ist zum 31.12.2015 beendet worden.  
Ein Abschlussbericht wird bis zum 31.03.2016 erstellt.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2016.

#### 5 Literatur

AquaVision (2009-2011), Suspended Sediment Measurements, *Reports on 7 field surveys conducted by commission of the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), Germany*.  
CF-Conventions (2015), NetCDF CF Metadata Conventions. <http://cfconventions.org/>, letzter Zugriff: 30.01.2015.  
NODC (2015), The National Oceanographic Data Center (NODC). NODC NetCDF Templates v1.1. <http://www.nodc.noaa.gov/data/formats/netcdf/v1.1/#templatesexamples>, letzter Zugriff: 30.01.2015).

#### 6 Veröffentlichungen

Grünler, G. & Maushake, C. (2013), Field Studies of Suspended Sediment Dynamics in Estuaries. Poster at the International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes (Intercoh) 2013. In: <http://ewisa.baw.de/publication/1097>.  
Zorndt, A., Grünler, S., Schiller, U., Kösters, F. (2015): Hydrodynamic and suspended sediment patterns in the estuarine turbidity zone of a mesotidal estuary from cross-sectional ADCP measurements and numerical simulations. Vol. 17, EGU2015-13070-1, 2015, EGU General Assembly 2015  
Kösters, F., Grünler, S. and Becker, M. (2014): Suspended Sediment Dynamics in the Mixing Zone - a Case Study from the Weser Estuary. Presentation at the 11<sup>th</sup> International Conference on Hydroscience & Engineering, Hamburg, Germany.  
BAWiki:  
<http://wiki.baw.de/methoden/index.php5/ADCP-NetCDF>

## **Modulares System für Schelfmeere und Küsten (MOSSCO)**

**Netzplan-Nr.:** A39550270155

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. F. Kösters, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Ästuarsysteme I (K2)

**Bearbeiter:** Dr.-Ing. M. Hassan Naser Moaddeli

**E-Mail:** hassan.nasermoaddeli@baw.de  
frank.koesters@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Forschung für Nachhaltigkeit (FONA)“ wurde das Projekt „Modulares System für Schelfmeere und Küsten“ (MOSSCO) gefördert. MOSSCO ist ein Verbundprojekt des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, Institut für Küstenforschung (HZG), des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und der BAW. Von der BAW wird das Teilprojekt „Anwendung für den Sedimenttransport: Die Rolle der Biologie“ durchgeführt, um bestehende Modellsysteme für die Abbildung des Bodens (Sedimenttransport, Deposition und Erosion), sowie Modelle der bodennahen (benthischen) Flora und Fauna für die Nutzung im integrierten Modellsystem vorzubereiten und zu implementieren.

Die heute im Küsteningenieurwesen eingesetzten Modellverfahren berücksichtigen zum Großteil keine biologischen Einflüsse sondern sind auf eine rein abiotische Betrachtungsweise ausgelegt. Insbesondere bei der Betrachtung des Transports suspendierter Sedimente stellt diese Entkopplung ein potenzielles Defizit der Ergebnisqualität dar, da die Beeinflussung biologischer Prozesse auf das Absetzverhalten suspendierter Sedimente nicht berücksichtigt wird. Hinzu kommt, dass die Erosion von Sedimenten maßgeblich durch biologische Parameter wie der Häufigkeit und der Wirkung von Makrofauna oder mikrobieller Stabilisierung der oberen Sedimentschicht beeinflusst sein können..

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die BAW kann mit diesem Teilprojekt ihre schon heute herausragende wissenschaftliche Kompetenz insbesondere im Hinblick auf die zunehmende Verzahnung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit den vielfältigen (öffentlichen und privaten) Planungsvorhaben im Ästuar- und Küstenbereich weiter ausbauen und somit die Beratungsqualität für die WSV weiter steigern. So werden die an den Universitäten und Großforschungseinrichtungen erarbeiteten Methoden direkt für die angewandte Forschung in der BAW genutzt und fördern die kontinuierliche Weiterentwicklung der Methoden und Verfahren. Die von der BAW im Projekt erarbeiteten und dokumentierten Ergebnisse werden für die WSV im Hinblick auf die Aufgaben des Sedimentmanagements und der Wasserstraßenunterhaltung aufbereitet und zur Nutzung zur Verfügung gestellt. Somit bildet MOSSCO einen Baustein zur integrierten Betrachtung kohäsiver Sedimentdynamik und biogeochemischer Nährstoffzyklen. Dies ist bereits heute eine drängende Frage der WSV, deren Bedeutung in Zukunft noch weiter zunehmen wird.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Teilprojekt der BAW bearbeitet schwerpunktmäßig die Schnittstelle zwischen Wassersäule und Boden. Im Rahmen dieses Teilprojektes werden bestehende Modellsysteme für die Abbildung des Bodens (Sedimenttransport, Deposition und Erosion), sowie Modelle des Einflusses der bodennahen (benthischen) Flora und Fauna auf den Sedimenttransport für die Nutzung im integrierten Modellsystem vorbereitet und implementiert. Das modulare Modellsystem soll dazu dienen die Wechselwirkung zwischen Biologie und Sediment näher zu untersuchen. Schwerpunkte bilden dabei zunächst 1D-Systemstudien zur biologisch beeinflussten Flokkulation kohäsiver Sedimente in der Wassersäule, sowie durch z.B. Algenauflage veränderte Erosionseigenschaften der Sedimente am Boden. Im nächsten Schritt soll die Erweiterung auf reale Systeme (3D) und die Bewertung der hinzugenommenen biologischen Prozesse für die Sedimentdynamik in Nord- und Ostsee erfolgen.



- Ziel 1: Aufbau und Validierung eines Geoökologiemoduls zur Nutzung im Rahmen des modularen Modellsystems
- Ziel 2: Beschreibung gekoppelter biologischer und sedimentologischer Prozesse für die Dynamik kohäsiver Sedimente im Flachwasserbereich und Ableitung möglicher Parametrisierungen (Publikation 1)
- Ziel 3: Quantifizierung des Einflusses benthischer Makrofauna und des Mikrophytobenthos für den Sedimenttransport (Publikation 2)

## 2 Untersuchungsmethoden

Der wesentliche Bestandteil des Projekts ist die Entwicklung und Anwendung numerischer Untersuchungsmethoden, dazu werden numerische Verfahren zur Simulation der Hydrodynamik, des Stofftransports und biogeochemischer Stoffkreisläufe eingesetzt. Im ersten Schritt wird eine geeignete Kopplungsstrategie der einzelnen Verfahren entwickelt. Für den Austausch zwischen Erdsystemkompartimenten (z.B., Benthos – Pelagial) wird das „Earth System Modeling Framework (ESMF)“ aus der Klimaforschung eingesetzt. Innerhalb eines Kompartiments erfolgt die Kopplung mittels des „Framework for Aquatic Biogeochemical Models (FABM)“.

Die Anwendbarkeit des Systems wird zunächst anhand von 1D Modellen gezeigt und für Systemstudien zur näheren Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung von Biologie und suspendiertem Sediment genutzt. Im Anschluss erfolgt die Erweiterung auf dreidimensionale Modelle. Mit einer bestehenden Modellkonfiguration für die Nord- und Ostsee werden zwei Referenzjahre berechnet, um die großräumigen Sedimenttransporte genauer zu untersuchen. Diese Untersuchungen werden durch die Analyse von bestehenden Messdaten im Sinne einer Modellvalidierung ergänzt.

## 3 Ergebnisse

**WP-A** Dieses Arbeitspaket wurde in 2014 abgeschlossen.

**WP-B** Dieses Arbeitspaket wurde in 2014 abgeschlossen.

**WP-C** Neben den bisher aufbereiteten Daten, wurden flächenhafte biologische Datensätze am Beispiel *Tellina fabula* (ein Muschelart) in der deutschen Bucht erarbeitet. Zusätzlich wurden Zeitreihen des Sedimenteintrages aus den Einzugsgebieten der Zuflüsse aufbereitet.

**WP-D** Dieses Arbeitspaket wurde in 2014 abgeschlossen.

**WP-E** Dieses Arbeitspaket wurde in 2014 abgeschlossen.

**WP-F** Das MOSSCO-3D Modellsystem wurde zunächst für die südliche Nordsee (SNS) getestet, Nach mehreren Testfällen wurde festgestellt, dass eine generische Kopplung unerlässlich ist, um Kommunikation von zahlreichen 4D-Variablen (3D räumlich und zeitliche Feldern) zwischen mehreren gekoppelten Modellen, automatisch, effizient und flexibel zu gestalten. Hierzu wurden, neben Anpassung der MOSSCO-Kommunikations-Infrastruktur durch Projekt-Partner, Schnittstellen von Geologie und Biologie in den Modellkomponenten aufwendig angepasst und mit zahlreichen Simulationsläufen getestet. Darüber hinaus wurde das 3D-Sedimenttransport Modell auch für nicht-kohäsive Sedimente erweitert. Des Weiteren wurde die Seegang-Sediment-Kopplung realisiert.

Insgesamt musste das WP-F wesentlich intensiver als ursprünglich geplant bearbeitet werden, um eine hohe Güte und Qualität der Modellkopplung zu erlangen.

**WP-G** Aufgrund der mit den Projektpartnern abgestimmten Priorisierung der Projektarbeiten in WP-F kann die Bearbeitung dieses Arbeitspakets nicht mehr im Rahmen des Projektes gewährleistet werden. Das Gesamtziel des Projektes wird jedoch nicht gefährdet.

**WP-H** Aufgrund der mit den Projektpartnern abgestimmten Priorisierung der Projektarbeiten in WP-F kann die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes nicht mehr im Rahmen des Projektes gewährleistet werden. Das Gesamtziel des Projektes wird jedoch nicht gefährdet.

**WP-I** Es wird beabsichtigt, dieses Arbeitspaket in 2016 in gekürzter Form zu bearbeiten.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015/2016: **WP-J** Szenariorechnung mit voll gekoppeltem Geoökologiemodul; Synthese der Ergebnisse und zweite Publikation

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2016.

#### 5 Literatur

Soulsby, R. L., Clarke, S. (2005): Bed shear stress under combined wave and currents on smooth and rough beds. Produced within Defra Project FD1905 (EstProc)-Report TR137. In: HR Wallingford.

#### 6 Veröffentlichungen

Nasermoaddeli, M.H., Lemmen, C., Hofmeister, R., Kösters, F. and Klingbeil, K. (2014a): The benthic geoecology model within the modular system for shelves and coasts (MOSSCO), 11th International Conference on Hydroinformatics (HIC), New York City, USA, August 17 bis 21, 2014a,

Nasermoaddeli, M.H., Kösters, F., Hofmeister, R., Lemmen, C., Wirtz, K.W. (2014b): First results of modelling benthos influence on sediment entrainment using a generic approach within the MOSSCO framework, 11 International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE), Hamburg, Germany, 28. September bis 2. Oktober 2014b.

Hofmeister R, Lemmen C, Kerimoglu O, Wirtz KW, Nasermoaddeli MH (2014b): The Predominant Processes Controlling Vertical Nutrient and Suspended Matter Fluxes across Domains - Using the New MOSSCO System Form Coastal Sea Sediments up to the Atmosphere. 11 International Conference on Hydrosience and Engineering (ICHE), Hamburg, Germany, 28. September bis 2. Oktober 2014b.

Nasermoaddeli, M.H., Kösters, F., Lemmen, C., Wirtz, K. W., Klingbeil, K., Hofmeister, R., Burchard, H. (2015): Modelling the effects of benthic organisms on sediment transport and challenges. Poster-Veröffentlichung: Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM) Hamburg, 15. bis 17. April 2015

## **Historische Systemzustände des Weser-Ästuars (HIWEST)**

**Netzplan-Nr.:** A39550270168

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. F. Kösters, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I

**Bearbeiterin:** U. Schiller, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme I

**E-Mail:** frank.koesters@baw.de, ulrike.schiller@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Ausbauten und die Errichtung von Strombauwerken im letzten Jahrhundert haben stark in den natürlichen Gewässerverlauf der Unter- und Außenweser eingegriffen. Diese Maßnahmen müssen unter heutigen Gesichtspunkten kritisch betrachtet werden. Dazu sind die hydraulischen Eigenschaften historischer morphologischer Systemzustände des Weser-Ästuars mit aktuellen Methoden zu analysieren und zu bewerten. Notwendige Datengrundlage für diese Untersuchungen sind konsistente digitale Bathymetrien, die aus alten, teilweise noch in analoger Form vorliegenden Vermessungsdaten, aufbereitet werden müssen.

Diese Bathymetrien sind daher ein essentieller Bestandteil beim Aufbau historischer hydrodynamischer morphodynamischer numerischer Modelle. Da zukünftige morphologische Entwicklungen im Ästuar infolge des Klimawandels, neuer Strombaumaßnahmen und der Notwendigkeit effizienter Unterhaltungsstrategien immer mehr in den Fokus wasserbaulicher Fragestellungen rücken, steigen auch die Anforderungen an die Prognosefähigkeit der eingesetzten numerischen Modelle. Verlässliche Aussagen über zukünftige Veränderungen sind jedoch erst dann möglich, wenn durch Hindcast-Simulationen maßgebliche morphologische Tendenzen im Modell qualitativ und quantitativ nachgebildet werden können. Konsistente digitale historische Bathymetrien liefern dazu eine erweiterte Validierungsgrundlage, die eine Ausdehnung des Untersuchungszeitraums erlaubt.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die zukünftige morphologische Entwicklung als Folge natürlicher Veränderungen oder anthropogener Eingriffe ist eine der zentralen Fragen im Verkehrswasserbau. Ein im Hinblick auf Ökologie und Ökonomie optimiertes Gewässermanagement basiert immer mehr auf Ergebnissen numerischer Modelle, deren Prognosefähigkeit fortwährend zu verbessern und zu validieren ist.

So ist im Rahmen von wasserbaulichen Maßnahmen wie aktuell die Fahrrinnenanpassung der Weser die WSV in der Situation, nicht nur aktuelle sondern auch vorangegangene Maßnahmen in ihrer Wirkung bewerten zu müssen. Konsistente digitale Bathymetrien als synoptische Abbilder des Gewässerbetts lassen unmittelbar Rückschlüsse auf morphologische Veränderungen zu, deren hydraulische Auswirkungen mit numerischen Hindcast Simulationen untersucht werden können. Damit liefern die historischen Zustände einen wichtigen Beitrag in der Beurteilung von Einzelmaßnahmen.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Dieses FuE-Projekt verfolgt drei wesentliche Untersuchungsziele:

[UZ1] die Erstellung konsistenter, historischer Bathymetrien,

[UZ2] die Analyse der morphologischen Änderungen und

[UZ3] die numerische Simulation hydrodynamischer Zustände für die zurückliegenden Zeitscheiben.

## **2 Untersuchungsmethoden**

- Datenrecherche und -akquise in Zusammenarbeit mit WSV und BSH; Aufbau der digitalen Bathymetrien auf Basis der Daten (Vektorisierung des Datenbestandes) als Vergabe
- Analyse der morphologischen Änderungen mit der im Hause verfügbaren Software (Gismo, ArcGis)

- Nachgelagerte Anwendung: Hydrodynamische Modellierung mit einem numerischen BAW Standardverfahren (UnTRIM oder Delft3D)

### 3 Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde das erste Arbeitspaket (Datenrecherche und –bereitstellung) abgeschlossen.

Die Arbeiten zu WP 2 (s. Abschnitt 4), der Definition von Anforderungen an die Aufbereitung und Vektorisierung der Daten als Leistungsverzeichnis, sind angelaufen.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Hinweis: Das ursprüngliche Arbeitsprogramm musste aufgrund unvorhergesehener Priorisierung von WSV-Aufträgen angepasst werden. Die Projektinhalte wurden auf die Vektorisierung des bereits erhobenen Datenbestandes (WP 2) und der nachfolgenden Analyse morphologischer Änderungen (WP 3) reduziert. WP 4 wird gestrichen.

11/2015 – 8/2016

[WP2] Ausschreibung und Vergabe der Vektorisierung des Datenbestandes und der DGM Erstellung.

8/2016 – 12/2016

[WP3] Analyse der Bathymetrien aus [WP1] hinsichtlich morphologischer Änderungen sowie deren Bewertung in Bezug auf anthropogene Eingriffe, natürliche Entwicklungstendenzen und sonstige Einflussgrößen. Dies setzt insbesondere die Aufarbeitung von Informationen zu den anthropogenen Eingriffen, z.B. Sandentnahmen für den Bau von Sturmflutsperrwerken, voraus.

(gestrichen, - 5/2017)

[WP4] Hydrodynamische Modellierung der einzelnen Zeitscheiben für vereinfachte Randbedingungen (astronomische Tide, keine Meteorologie). Aufgeteilt in den Vergleich der einzelnen Systemzuständen für einen Satz von vereinfachten Randbedingungen, sowie astronomische Randbedingungen mit repräsentativem Antrieb des jeweiligen Jahres zum Vergleich ausgewählter Tidekennwerte (Tnw, Thw, Thb) mit verfügbaren Beobachtungen.

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2017.

### 5 Literatur

- Herrling, G. und Niemeyer, H. (2008): Harbasins Report: Hydro- and Morphological Pressures and Impacts, 28 S.
- Milbradt, P., Sellerhoff, F., Krönert, N. (2005): Abschlussbericht KoDiBa (03KIS042) - Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Aufbereitung konsistenter digitaler Bathymetrien
- NLWKN (2010): Historisches Kartenmaterial nach Homeier, Berichte der Forschungsstelle Küste, Band 43/2010, 133 S.
- Van der Wegen, M., Jaffe, B.E., Roelvink, J.A. (2011): Process-based, morphodynamic hindcast of decadal deposition patterns in San Pablo Bay, California, 1856-1887, Journal of Geophysical Research F: Earth Surface 116 (2), doi:10.1029/2009JF001614
- Wetzel, V. (1987): Der Ausbau des Weserfahrwassers von 1921 bis heute, In: Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Band 42, S. 83-105.
- Wienberg, C. (2003): Korrigiert und ausgebagert – Die Außenweser im Wandel der Zeit, In: Korrigiert und ausgebagert – Die Außenweser im Wandel der Zeit, Hansestudien, Band 3, S. 139-160

### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserastuar - MorphoWeser**

**Netzplan-Nr.:** A39550270223

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. F. Kösters, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**Bearbeiterin:** Dr.-Ing. A. Zorndt, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** frank.koesters@baw.de, anna.zorndt@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die weitläufigen Watten im Gebiet der Außenweser sind morphologisch aktive Bereiche und zeichnen sich durch dynamische Rinnensysteme aus, die durch ein Zusammenspiel verschiedener Randbedingungen beeinflusst werden. Kösters und Winter (2014) untersuchten die Wirkung von Wind-, Wellen und Gezeitenströmungen auf die Morphodynamik der Deutschen Bucht auf Basis von Messungen und numerischen Modellergebnissen. Tideinduzierte Strömungen sind die treibende Kraft bei den beobachteten morphologischen Änderungen der Rinnensysteme in den äußeren Ästuaren von Elbe, Weser und Ems, der Jadebucht und den ostfriesischen Seegatten.. Das Transportverhalten der Sedimente in der Unterweser ist ebenfalls stark tidegetrieben; Lage und Inventar des ästuarinen Trübungsmaximums werden von der Höhe des Oberwassers und anderen saisonalen und meteorologischen Bedingungen (vgl. Grabemann und Krause 2001) beeinflusst.

Es ergibt sich hieraus, dass sowohl in der Außenweser, als auch in der Unterweser nicht nur der Tideeinfluss, sondern auch energiereiche meteorologische oder hydrologische Einzelereignisse einen Einfluss auf Transportverhalten der Sedimente und die morphologische Entwicklung haben können. Im Rahmen dieses Projektes soll untersucht werden, wie die morphologische Reaktion der Rinnensysteme im Bereich der Außenweser auf Sturmereignisse ist und welche morphologischen Änderungen sich aus hohen Oberwasserabflüssen in der Unterweser ergeben.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Hinblick auf die Beratung der WSV durch die BAW ist es notwendig, dem wissenschaftlichen Fortschritt bei der Abbildung des Sedimenttransports Rechnung zu tragen und eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Bearbeitungsmethoden und eingesetzten Modellverfahren sicher zu stellen. Durch eine verbesserte Abbildung morphodynamischer Prozesse kann die Beratungsleistung der BAW im Hinblick auf das Sedimentmanagement weiter erhöht und das Fernziel einer modellbasierten Prognose weiter verfolgt werden.

Zur Optimierung des Sedimentmanagements und zur sicheren Prognose der Wirkung wasserbaulicher Maßnahmen ist es ein umfassendes Verständnis der Sedimentdynamik im Arbeitsgebiet notwendig. Durch langjährige Erfahrung in der Unterhaltung ist bekannt, dass sich die Mindertiefen, in denen Baggermaßnahmen anfallen, in Abhängigkeit des Oberwassers verlagern. Eine Prognose ist derzeit jedoch noch nicht möglich. Greiferproben des WSA Bremerhaven zeigen, dass die Sedimente an der Gewässersohle in der Fahrrinne in den Bereichen des Blexer Bogens und der Schlickstrecke Nordenhams fast ausschließlich aus Schluffen mit variablen aber im Mittel hohen organischen Bestandteilen (>6 % Glühverlust) bestehen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, sowohl den Einfluss von hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen, als auch die Transportprozesse selbst besser verstehen und abbilden zu können.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Voraussetzung für die geplanten Analysen ist die Aktualisierung des bisherigen Sedimenttransport- und Morphodynamikmodells der Unter – und Außenweser. Dazu ist neben einer Aufbereitung des aktuellen Stands des Wissens auch die Aufbereitung und Analyse von Messdaten notwendig.

- Ziel 1: Sedimenttransport- und Morphodynamikmodell der Unter – und Außenweser ist aktualisiert
- Ziel 2: Validierungsdaten sind aufbereitet

Als Hauptuntersuchungsziel erlaubt der Abgleich der Modellergebnisse mit Messdaten eine Abschätzung der Prognosegenauigkeit für Kenngrößen des Sedimenttransports und morphologischer Ände-

rungen. Insbesondere die Effekte meteorologischer und hydrologischer Ereignisse stellen einen weiteren Untersuchungsschwerpunkt dar, deren Wirkung quantifiziert werden soll.

- Ziel 3: Modellvalidierung ist abgeschlossen, die Prognosegenauigkeit kann quantifiziert werden
- Ziel 4: Hydrologische und meteorologische Effekte lassen sich im Hinblick auf ihre Wirkung auf Sedimenttransport und Morphodynamik für den Untersuchungsbereich quantifizieren.
- Ziel 5: Anforderungen an zukünftige Messprogramme sind formuliert und pilotartig getestet.

In weitergehenden wissenschaftlichen Untersuchungen ist geplant, die zugrundeliegenden Prozessbeschreibungen (Transportformulierungen nicht-kohäsiver Sedimente und kohäsiver Sedimente) weiter zu entwickeln und so eine Verbesserung der Modellgüte zu erreichen.

- Ziel 6: Prozessbeschreibungen sind evaluiert und Optimierungsmöglichkeiten liegen ggf. vor.

## 2 Untersuchungsmethoden

Vorrangig werden die numerischen Verfahren Delft3D und UnTRIM-SediMorph für die zu untersuchenden Fragestellungen eingesetzt. Daneben werden vorhandene Messdaten aufbereitet und analysiert, sowie neue Messkonzepte entwickelt.

## 3 Ergebnisse

Im Projektjahr 2015 wurden die Arbeitspakete (AP) „Messdatenaufbereitung und -analyse“, „Aufbau Wesermodell (UnTRIM-SediMorph)“ und „Aufbau Wesermodell (Delft3D)“ weiter geführt sowie das Arbeitspaket „Modellkalibrierung und -validierung“ begonnen.

Im AP „Messdatenaufbereitung und -analyse“ gab es folgende Aktivitäten: Die im Jahr 2014 begonnene Sondermesskampagne monatlicher Höhenmessungen von Wattkanten am Suezpriel wurde abgeschlossen. Insgesamt wurden 10 Messungen mit einem durchschnittlichen zeitlichen Abstand von 43 Tagen erhoben. Gemittelt über alle Profile und alle Messpaare ergibt sich eine mittlere Migrationsgeschwindigkeit der -1,75 m Höhenlinie am Westufer von 8 m/a in östliche Richtung; am Ostufer beträgt diese 17 m/a. Es ist keine Beeinflussung durch die Sturmereignisse während des Untersuchungszeitraums nachzuweisen. Dies soll anhand von Daten mit einer höheren zeitlichen Auflösung weiter untersucht werden. Daher wurde durch das Marum an der Universität Bremen ein Konzept für eine Kameramessung im Bereich des Wremer Lochs entwickelt. Ebenfalls durch Marum erfolgte eine umfangreiche Untersuchung der morphologischen Entwicklung des Fedderwarder Priels mit Hilfe von Differenztopographien.

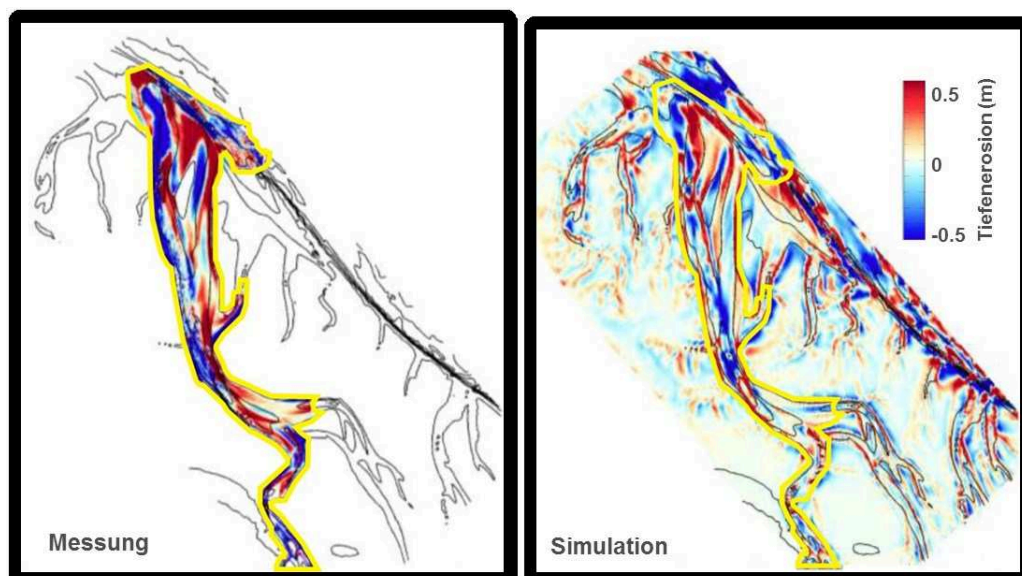


Bild 5: Erste Gegenüberstellung einer Differenztopographie (links) mit Ergebnissen eines morphodynamischen Modelllaufs des Modellsystems Delft3D (rechts). Der von beiden Datenquellen abgedeckte Bereich im Fokusgebiet Fedderwarder Priel ist mit Hilfe eines gelben Polygons dargestellt (modifiziert nach Herrling, 2014, persönliche Kommunikation).

Die Bearbeitung des AP „Aufbau Wesermodell (UnTRIM-SediMorph)“ wurde weiter geführt; das AP „Modellkalibrierung und -validierung“ wurde begonnen. Das hier verwendete Modell des Jadeweserästuars ist in der Lage, die Trübungszone naturähnlich abzubilden. Zurzeit werden Neuentwicklungen des Simulationswerkzeugs SediMorph genutzt, um weitere Verbesserungen zu erzielen.

Ebenfalls weiter geführt wurde das AP „Aufbau Wesermodell (Delft3D)“. Dies wird durch zwei externe universitäre Partner (TU Hamburg-Harburg, Universität Bremen) bearbeitet und von der BAW fachlich eng begleitet: Der Schwerpunkt der TU Hamburg-Harburg ist die naturähnliche Abbildung der Trübungszone im Modell. Hierfür wurde ein dreidimensionales Jadeweser-Ästuar Modell mit dem Modellsystem Delft3D aufgebaut. Eine erste Version des Modells verfolgt einen Modellansatz, in dem die Trübungszone ohne lange Einrechnung aus einer dem Modell vorgegebenen, naturähnlichen Sedimentverteilung am Boden generiert wird (Hesse und Fröhle, 2015). Die Modellergebnisse weisen bereits eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit Messwerten bezüglich der Wasserstände, Salzgehalte und Sedimentkonzentrationen auf. Es wurde weiterhin mit dem Aufbau eines Modells begonnen, in dem das Sedimentinventar über Randwerte eingesteuert und über lange Simulationsdauern naturähnlich im Modellgebiet verteilt wird. Der Schwerpunkt des Marums der Universität Bremen ist die langzeitmorphodynamische Modellierung der Außenweser. Hierfür wurde ein zweidimensionales Jadeweser-Ästuar Modell mit dem Modellsystem Delft3D aufgebaut, welches mit einem Modell zur Seegansberechnung online gekoppelt ist. Erste Ergebnisse zeigen, dass die natürliche morphodynamische Entwicklung im Fokusgebiet Fedderwarder Priel vom Modell teilweise wiedergegeben werden kann (Abbildung 1), mögliche Ansätze für Verbesserungen werden derzeit getestet.

Eine weitere Aktivität stellte die Organisation eines eintägigen Delft3D Workshops an der Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg dar, der von insgesamt 18 Teilnehmern von Universitäten und (behördlichen) Forschungseinrichtungen deutschlandweit besucht wurde.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016 AP: Hindcast 2012  
AP: Modelloptimierung  
bis 12/2017  
AP Prozessstudien  
AP Messkonzepte und Pilotmessungen

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2017.

#### 5 Literatur

- Grabemann, I., Krause, G. (2001): On Different Time Scales of Suspended Matter Dynamics in the Weser Estuary. In: *Estuaries* 24(5), S. 688-698.
- Hesse, R., Fröhle, P. (2015): Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar- Untersuchungen zur Dynamik kohäsiver Sedimente in der Weser im Abschnitt Blexer Bogen und Nordenham - Dokumentation Modellaufbau (04.08.2015, unveröffentlicht).
- Kösters, F., Winter, C. (2014): Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress. In: *Geo-Mar Lett* 34 (1), S. 21–36. DOI: 10.1007/s00367-013-0346-y.

#### 6 Veröffentlichungen

- Zorndt, A., Grünler, S., Schiller, U., Kösters, F. (2015): Hydrodynamic and suspended sediment patterns in the estuarine turbidity maximum zone, EGU General Assembly 2015, Wien, 15. April 2015
- Zorndt, A., Herrling, G. (2015): Methoden der Simulation morphodynamischer Prozesse in Ästuaren. Veröffentlichung: Tagungsband zu „Morphodynamics 2015“, Workshop on Numerical Methods of Water-Soil Boundary Layers under Currents and Waves, Hamburg, 22. September 2015, TU Hamburg-Harburg (Hrsg.)

## **Verbesserung der Validität und der Prognosefähigkeit des morphodynamischen Verfahrens SediMorph – Phase 2**

**Netzplan-Nr.:** A39550370178

**Projektleiter:** Dr.-Ing. H. Weilbeer, Dipl-Geoök. B. Fricke, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

**Bearbeiter:** Dipl.-Geoök. B. Fricke, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat K3

**E-Mail:** holger.weilbeer@baw.de; benjamin.fricke@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Fragen nach Veränderungen der Hydrodynamik, des Sedimenttransportregimes und damit auch nach einer zukünftigen morphodynamischen Entwicklung des Gewässers gehören auch im Küstenraum zu den primären Fragen, die im Zusammenhang mit veränderten Bedingungen, wie z.B. infolge von Baumaßnahmen oder infolge des Klimawandels, gestellt werden. Eine detaillierte und umfassende Kenntnis der Hydrodynamik und der Transportprozesse des Gewässers ist die wichtigste Grundlage für das Verständnis des Systems und somit eine unverzichtbare Voraussetzung für prognostische Aussagen.

Der Sedimenttransport unterliegt in einem natürlichen System aufgrund der Heterogenität der Sedimente und deren Transporteigenschaften einer starken räumlichen und zeitlichen Variabilität. Eine exakte Berechnung des natürlichen Sedimenttransportes und damit auch der Prognose einer morphodynamischen Entwicklung ist unmöglich. Modellansätze sind stets parameterbehaftet und analytische Lösungen gibt es nur für wenige idealisierte Systeme. Diese Aussagen gelten sowohl für dreidimensionale, kurzfristige und prozessorientierte Modelle als auch in zunehmendem Maße für vereinfachte Modelle, bei denen zugunsten des Prognosezeitraumes die räumliche und zeitliche Auflösung, die Intensität der Kopplung und die Komplexität der Modellierung reduziert werden.

Dennoch ist der Einsatz solcher Modelltypen für morphodynamische Fragestellungen erforderlich. Die Weiterentwicklungen der Modelltechnik und der Computerressourcen im letzten Jahrzehnt haben es ermöglicht, einen großen Abschnitt auf dem Weg von qualitativen hin zu quantitativen Aussagen zurückzulegen. Bei guter Datengrundlage und fachkundiger Modellierung können durchaus plausible Ergebnisse erzielt werden, die ein wichtiges Hilfsmittel bei der Beantwortung der oben genannten Fragestellung darstellen. Die Vertrauenswürdigkeit der Modellergebnisse muss aber weiter verbessert werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die zukünftige morphodynamische Entwicklung von Bundeswasserstrassen an sich und als Folge von Bau- oder Unterhaltungsstrategien oder als Folge des Klimawandels ist eine zentrale Frage des Verkehrswasserbaus. Die morphologische Entwicklung der Gewässersohle kann die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gefährden, verursacht Baggerkosten und steht auch im Zentrum umweltrelevanter Fragestellungen, da z.B. Schadstoffe an Feinsedimente gebunden sind.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Mit Hilfe des FuE-Vorhabens soll die Zuverlässigkeit der morphodynamischen Modellprognosen gesteigert werden. Ein neues Bodenmodell, das eine bessere Repräsentation der natürlichen Variabilität eines Bodens vor allem in der Vertikale ermöglicht, soll entwickelt werden. Ausgehend von der Sedimentverteilung und der Zusammensetzung der deponierten Sedimente soll die vertikale Schichtung über die Einteilung in Bodenarten definiert werden.

### **2 Untersuchungsmethoden**

- Literaturrecherche
- Softwareentwicklung



- Numerische Modellierung

### 3 Ergebnisse

Im Mittelpunkt steht ein stratigrafisches Bodenmodell zur detaillierten Abbildung von Sedimenttransportprozessen. Nach erfolgreichen Einsätzen an einfachen Systemen wurde das in SediMorph integrierte Bodenmodell auch am Ästuarmodell der Elbe angewendet und die Funktionalität des Modells wurde weiter bestätigt.

Weiterhin wurden Verbesserungen an der bereits bestehenden 3D-Funktionalität vorgenommen und eine Option zur Vorgabe eines vereinfachten vertikal variablen Anfangszustandes der Sedimentverteilung ergänzt.

Je nach vorherrschenden Strömungsbedingungen können insbesondere feinsandige Sedimente als Geschiebe, aber auch in Suspension transportiert werden. Hierfür wurde eine dritte Transportart definiert und so implementiert, dass im Zusammenwirken mit dem hydrodynamischen Modell programmintern ein Wechsel der Transportarten stattfinden kann.

Ein neues Upwind-Schema für den Geschiebetransport wurde durch die Universität der Bundeswehr München nach den Erkenntnissen von Volp (2015) entwickelt und in SediMorph integriert. Das neue Verfahren berücksichtigt zusätzlich zu der Richtung der Strömung auch den Sohlgradienten und verbessert damit die Stabilität der Lösung der Exner-Gleichung.

Es fanden Arbeiten statt, um die Simulationsergebnisse von SediMorph zusätzlich zu dem bestehenden Ausgabeformat BDF jetzt auch in NetCDF-Dateien herauszuschreiben zu können. Dies hat den Vorteil, dass die Daten dann exakt an den Orten herausgeschrieben werden, an denen sie auch berechnet werden und nicht mehr auf die Knoten interpoliert werden müssen. Zusätzlich vereinfacht dies den Datenaustausch mit anderen Institutionen, da es sich bei NetCDF um ein weitverbreitetes, standardisiertes Datenformat handelt.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Es wird ein Ensemble an morphodynamischen Testfällen aus dem Labor und der Natur weiterentwickelt. Diese Testfälle sind unterschiedlicher Komplexität, so dass die Stärken und Schwächen des Modellverfahrens erkennbar werden. In einem iterativen Prozess zwischen Verbesserung des Modellverfahrens und Durchlaufen der Testfälle werden die Validität und die Prognosefähigkeit verbessert.

Allgemeine Aufgaben:

- a) Modellaufbau für ausgewählte Laborversuche
- b) Simulation und Analyse der Laborversuche
- c) Modellaufbau für ausgewählte Testfälle aus den Ästuaren
- d) Simulation und Analyse der Testfälle aus den Ästuaren
- e) Entwicklung und Integration neuer Ansätze
- f) Morphodynamische Validierung der Ästuarmodelle

Aufgaben Bodenmodell:

- 1) Literaturstudie zum Thema Strukturierung des Bodens
- 2) Entwicklung eines tiefenstrukturierten Bodenmodells
- 3) Implementierung des Bodenmodells in das Sedimenttransportmodell SediMorph
- 4) Tests mit ausgewählten Laborversuchen
- 5) Test am komplexen System (Elbe-Ästuar)

Zeitplan:

Jahr 2015/2016: Unterpunkte 3, 4 und 5

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2016.

## **5 Literatur**

Volp, N.D. et al. (2015): A subgrid based approach for morphodynamic modelling. Advances in Water Resources, <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.07.013>

## **6 Veröffentlichungen**

Fricke, B., Malcherek, A. (2014): A stratigraphic soil model for coastal morphodynamics. In: Proceedings of 11th International Conference on Hydroscience & Engineering (ICHE2014).

## **Interaktion von Größen des Sedimenttransports und der Wasserqualität in dreidimensionalen Ästuarmodellen**

**Netzplan-Nr.:** A39550370190

**Projektleiterin:** I. Holzwarth, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** ingrid.holzwarth@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Untersuchungen der BAW zu Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen an den Ästuaren berücksichtigen zurzeit ausschließlich abiotische Größen. Aussagen zu biologisch stark beeinflussten Größen, wie etwa dem Nährstoff- und Sauerstoffhaushalt, werden auf Grundlage anderer Untersuchungen getroffen. Eine getrennte Betrachtung abiotischer und biotischer Parameter entspricht nicht den in der Natur herrschenden Bedingungen, da es zahlreiche Wechselwirkungen zwischen ihnen gibt, die ihre Konzentrations- und Transporteigenschaften nennenswert beeinflussen. Beispielsweise bestehen Schwebstoffe zu variierenden Anteilen aus anorganischem sowie lebendem und totem organischem Material und entsprechend ihrer Zusammensetzung besitzen sie unterschiedliche Eigenschaften. In Erweiterung zu den bisher an der BAW durchgeführten Untersuchungen müssen bei der Simulation biologischer und chemischer Prozesse Stoffumsetzungen berücksichtigt werden. Dieses kann durch Gewässergütemodelle geleistet werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Ein Untersuchungswerkzeug, das es erlaubt, gleichzeitig abiotische und biotische Größen zu betrachten, ermöglicht eine umfassende Analyse der komplexen, im Ästuar auftretenden Prozesse. Dadurch wird es perspektivisch möglich sein, anthropogene Eingriffe hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Wasserstands- und Strömungsverhältnisse, den Salz- und Sedimenttransport sowie Größen mit einem starken biologischen Einfluss (z. B. gelösten Sauerstoff) anhand konsistenter Datensätze zu ermitteln.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Langfristiges Ziel ist die gekoppelte Simulation abiotischer Größen mit biotischen Größen wie Phytoplankton und Mikrophytobenthos im Bereich der deutschen Küstenwasserstraßen.

Aus den vorangegangenen Arbeiten hat sich ergeben, dass DelWAQ (DELTAWARE, 2013), als Modul zur Simulation der Gewässergüte geeignet ist, um in die Software-Umgebung der BAW eingegliedert zu werden. Die notwendigen technischen Arbeiten sind bereits definiert und begonnen worden. Sie müssen nun abgeschlossen werden, um ein Gewässergütemodell zunächst für das Ästuar der Elbe aufbauen zu können. Nach erfolgreicher Validierung eines Modells für die Elbe wird ein vergleichbares Modell für das Ästuar der Ems angestrebt.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Es werden zunächst Messdaten aus der Tideelbe analysiert um die relevanten Prozesse zu identifizieren. Auf Basis der so gewonnenen Erkenntnisse werden sukzessive numerische Modelle aufgebaut, beginnend mit wenigen Dimensionen und groben Auflösungen hin zu einem dreidimensionalen Modell mit einer hohen vertikalen und horizontalen Auflösung.

### **3 Ergebnisse**

#### **3.1 Messdaten Elbe**

Im Ästuar der Elbe wurden und werden Messungen zur Wasserqualität (WQ) durchgeführt. Im Rahmen des FuE-Projektes wurde eine Vielzahl der Messergebnisse bei den erhebenden Institutionen

erfragt bzw. aus öffentlich verfügbaren Datenportalen abgerufen. Diese Daten werden im geodata-Bereich der BAW Hamburg geprüft und abgelegt.

In 2014 sind insbesondere Messdaten vom landseitigen Modellrand (stromauf von Geesthacht) hinzugekommen. Die biochemischen Messungen an den Messstellen Cumlosen und Schnackenburg werden zwar ca. 120 km stromauf des Modellrandes erhoben, stellen binnenseitig aber die nächstliegenden kontinuierlichen Messungen. Die Messungen der beiden nahe beieinander liegenden Messstellen wurden miteinander verglichen und unter Zuhilfenahme von Einzelmessungen am Wehr Geesthacht zu Randwerten für das Elbmodell aufgearbeitet.

### 3.2 Programmtechnische Entwicklungen

Das Kopplungsmodul zwischen Untrim und Delwaq wurde zu einer Kopplung für 3D-Simulationen erweitert. Nach dem Auffinden und der Beseitigung eines relevanten Fehlers im Delwaq-Code für den z-Schichten-Modus sind 3D-Simulationen der Wasserqualität auf Basis von 3D-Simulationen der Hydrodynamik in Untrim möglich.

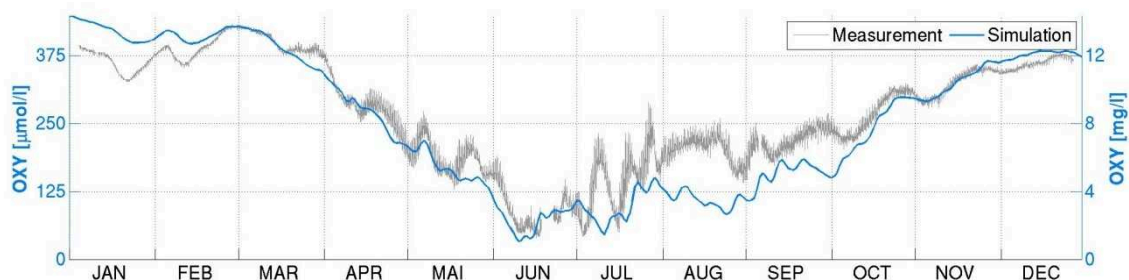
Eine Ertüchtigung der Deltares Visualisierungswerkzeuge ist nicht möglich, somit können 3D-Ergebnisse derzeit nicht visualisiert werden. Da in Delwaq die Möglichkeit fehlt, 2D-Ergebnisse aus 3D Rechnungen abzuspeichern, ist ein Arbeiten mit 3D-Systemen zurzeit nicht möglich. Die Lösung dieses Problems wird im Rahmen eines neuen FuE-Projektes angegangen.

Das Kopplungs-Modul wurde für die Ausgabe von Schwebstoffkonzentrationen erweitert, sodass es möglich ist, diese Größe als Summe aller Fraktionen bereits in der UnTRIM-Simulation zu berechnen und DelWAQ zur Verfügung zu stellen

### 3.3 DelWAQ-Modellaufbau schematische Elbe

Aufgrund der fehlenden Visualisierungsmöglichkeiten von dreidimensionalen Ergebnissen, wurden Modelle mit schematischen Geometrien für die Elbe aufgebaut und im 1D und 2D – Modus modelliert. Systemstudien hinsichtlich des Einflusses der Hydrodynamik auf die Wasserqualitätsgrößen, sowie Sensitivitätsstudien zum Einfluss unterschiedlicher Parameter der Konfiguration des Wasserqualitätsmodells auf die Sauerstoffkonzentration wurden durchgeführt.

Es wurde eine Delwaq-Modellkonfiguration erarbeitet, die es ermöglicht die grundsätzlichen jahreszeitlichen Entwicklungen des Sauerstoffgehaltes in der Tideelbe in Modellen mit schematischen Geometrien zu simulieren, siehe Bild 1.



**Bild 1:** Vergleich der Konzentration des gelösten Sauerstoffs zwischen der Messung in Seemannshöft (WGMN Hamburg) und der entsprechenden Position im Modell (km 43,5) für das Jahr 2011.

#### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

Das Arbeitsprogramm bis zu einer validierten Version eines Wasserqualitätsmodells der Tideelbe erstreckt sich über 31 Monate. Die Dokumentation der Arbeiten und Ergebnisse ist dabei eine Daueraufgabe und im Arbeitsprogramm nicht separat aufgeführt.

2016: Erstellung des Abschlussberichts

Laufzeit des Vorhabens: 2012 bis 2016.

#### **5 Literatur**

- Deltares (2013): D-Water Quality Process Library Description – Technical Reference Manual. Delft, The Netherlands
- Casulli, V., Stelling, G.S. (2010): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. Int. J. Numer. Meth. Fluids 67(4): 441–449

#### **6 Veröffentlichungen**

- Holzwarth, I. (2013): Coupling of Untrim2 and DelWAQ – Progress and first results. Vortrag, Untrim Users Meeting, Trento
- Holzwarth, I. (2013): (Modelling) Biogeochemical Processes in the Elbe Estuary. Vortrag in der Seminarreihe der Abteilung Ökosystemmodellierung am Helmholtz-Zentrum Geesthacht
- Holzwarth, I. (2014): Modeling accumulation in a schematic estuary. Vortrag in der Seminarreihe der Abteilung Ökosystemmodellierung am Helmholtz-Zentrum Geesthacht
- Holzwarth, I. (2014)\_ Progress in Untrim<sup>2</sup> – Delwaq. Vortrag, Untrim Users Meeting, Trento
- Holzwarth, I. und Hesse, R. (2014): Determinants of biogeochemical cycling in the Elbe – A model study. Poster. Workshop on Multiple Stable States in Estuaries. TU Hamburg-Harburg

## **Resilience-Increasing Strategies for Coasts - toolKIT (RISC-KIT)**

**Netzplan-Nr.:** A39550370213

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. G. Seiß, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** guntram.seiss@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Aktuelle und historische extreme Hochwasserereignisse mit niedriger Häufigkeit haben die Risiken aufgezeigt, denen exponierte Küstenregionen in Europa ausgesetzt sind. Risiko kann als Produkt aus der Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und seiner Konsequenzen verstanden werden. Berücksichtigt man die Auswirkungen des Klimawandels, werden beide Faktoren in der Zukunft nach heutigem Wissenstand zunehmen.

Die Konsequenzen eines Flutereignisses setzen sich aus der Exponiertheit und der Dichte der Besiedelung und Bebauung zusammen. Letztere wächst mit der wirtschaftlichen Entwicklung einer Region. Die Empfindlichkeit einer Region steigt zudem, wenn beispielsweise unangemessene Bauweisen verwendet werden. Durch indirekte Zusammenhänge wirken sich Flutschäden auch auf das Hinterland und dessen Ökonomie aus.

Der Anstieg des Risikos entlang der Küsten erfordert eine Neubewertung der Katastrophenvorsorge und Risikomanagementstrategien (disaster risk reduction, DRR) und eine neue Mischung aus Prävention (z.B. Deichschutz), Minderung (z.B. Begrenzung der Besiedelung hochwassergefährdeter Gebiete) und Vorsorgemaßnahmen (z.B. Frühwarnsysteme (EWS)). Bereitstehende Gelder aus Hochwasserversicherungen können zu einer schnelleren Erholung der betroffenen Regionen führen.

Auch sinkende öffentliche Budgets und eine wachsende Wertschätzung des ökologischen Wertes der Küstenregion machen eine Neubewertung von Ansätzen zur Risikoreduktion erforderlich. Hochwasserschutzmaßnahmen und DRR-Strategien müssen sich im Einklang mit Umweltbelangen, wirtschaftlichen Nutzungen und Tourismus bewegen.

RISC-KIT ist ein EU-Forschungsprojekt unter FP7 (Grant Agreement Number 603458). In RISC-KIT soll DRR als integrierte Kette von Aktionen betrachtet werden. Diese Kette beinhaltet das Verständnis der gegenwärtigen und historischen Situation im Kontext mit einer Region, die Beurteilung des Küstenrisikos für gegenwärtige und zukünftige Gefährdungswahrscheinlichkeiten, Identifizierung kritischer (Hot-Spot-) Bereiche höheren Risikos, der Gestaltung von DRR-Plänen einschließlich geeigneter Prävention, Eindämmung von Risiken und Vorsorgemaßnahmen (wie EWS), um die Risiken zu reduzieren und den Aufbau von Vertrauen und gesellschaftlicher Akzeptanz für solche Maßnahmen. Auf diese Weise kann eine wirksame Katastrophenvorsorge mit einer starken gesellschaftlichen Basis erreicht werden und wird Teil der Kultur. Die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen, um Risiken zu verringern und die Widerstandsfähigkeit der Küstenregionen zu erhöhen, erfordert einen interdisziplinären Ansatz. Durch das Zusammenwirken der 18 Projektpartner- aus unterschiedlichen Küstenregionen entsteht ein Wissensaustausch über das Thema. Folgende Institutionen sind neben der Bundesanstalt für Wasserbau in das Consortium als Partner eingebunden:

- Stichting Deltares, Delft, Niederlande
- Ecologic Institute, Berlin, Germany
- Consorzio Ferrara Ricerche, Ferrara, Italien
- University of Algarve, Faro, Portugal
- International Marine and Dredging Consultants, Antwerpen Belgium
- Institute of Oceanology, Varna, Bulgarien
- Littoral ENvironnement et Sociétés UMR 7266, La Rochelle, Frankreich
- Delft University of Technology, Delft, Niederlande
- World Meteorological Organisation, Genf, International
- Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spanien

- CIMA Research Foundation, Savona, Italien
- EurOcean Foundation, Lissabon, Portugal
- Stockholm Environment Institute, Stockholm, Schweden
- Middlesex University, Flood Hazard Research Center, London, Vereinigtes Königreich
- University of Caen, Caen, Frankreich
- University of Cambridge, Cambridge Coastal Research Unit, Cambridge, Vereinigtes Königreich
- UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, International.

## 1.2 Bedeutung für die WSV

Die Wasser- und Schifffahrtsämter sind über das Meldewesen in den Katastrophenschutz bei Hochwasserereignissen eingebunden. Die im Projekt erarbeiteten Werkzeuge können den Ämtern helfen, frühzeitig gezielte Warnungen an betroffene Gemeinden weiter zu leiten.

Ereignisse wie das Sturmhochwasser 1989 (Neemann 1994) in der westlichen Ostsee können erhebliche Schäden bei der Sportschifffahrt verursachen. Gesunkene Fahrzeuge können Zufahrten zu Hafenanlagen blockieren, Treibgut kann zu Behinderungen im Schiffsverkehr führen. Eine Minimierung der Risiken durch solche Ereignisse hilft somit auch, die Sicherheit der Wasserstraßen zu verbessern.

Das Projekt kann dabei helfen, den Wissensschatz über die Wirkung von extremen Wasserspiegelauslenkungen in der Ostsee auf Schifffahrtswege und Hafenanlagen zu erweitern.

## 1.3 Untersuchungsziel

Die Bundesanstalt für Wasserbau hat im Rahmen des Projektes die Betreuung der Fallstudienregion Kieler Förde übernommen. Das Arbeitspaket 1 beinhaltet die Bereitstellung von Daten und Software für die Arbeitspakete 4 und 5 für die Fallstudienregion. Im Arbeitspaket 2 werden die gewonnenen Daten zur Entwicklung eines Werkzeugs zur Risikoanalyse aufbereitet. Hierzu wurden aus der Fallstudienregion für ihre Verletzlichkeit gegenüber Hochwasser bekannte Objekte ermittelt und tiefenabhängige Risikokurven aufgestellt. Das Arbeitspaket 3 beschäftigt sich mit der Entwicklung eines modellgestützten Frühwarnsystems für Überflutungsereignisse. In Arbeitspaket 4 werden auf Grundlage der in Arbeitspaket 1 erarbeiteten Bestandsaufnahme Strategien entwickelt, mit bestimmten Gefährdungsmustern umzugehen. Arbeitspaket 5 beschäftigt sich mit dem Test des in Arbeitspaket 3 entwickelten Frühwarnsystems und der Überführung in einen operationellen Betrieb in der Fallstudienregion.

## 2 Untersuchungsmethoden

Für das Arbeitspaket 1 werden die physikalischen Daten aus den verfügbaren Quellen wie Datenbanken, Literatur und geographischen Informationssystemen zusammengetragen und für die Weiternutzung im Projekt sinnvoll aufbereitet. Es werden Interviews mit Personen aus verschiedenen Kreisen der Bevölkerung geführt.

Für die Risikobewertung werden Risikokurven für die Nutzung typischer Marinas an der Kieler Förde sowie der Strände und Campingplätze erarbeitet.

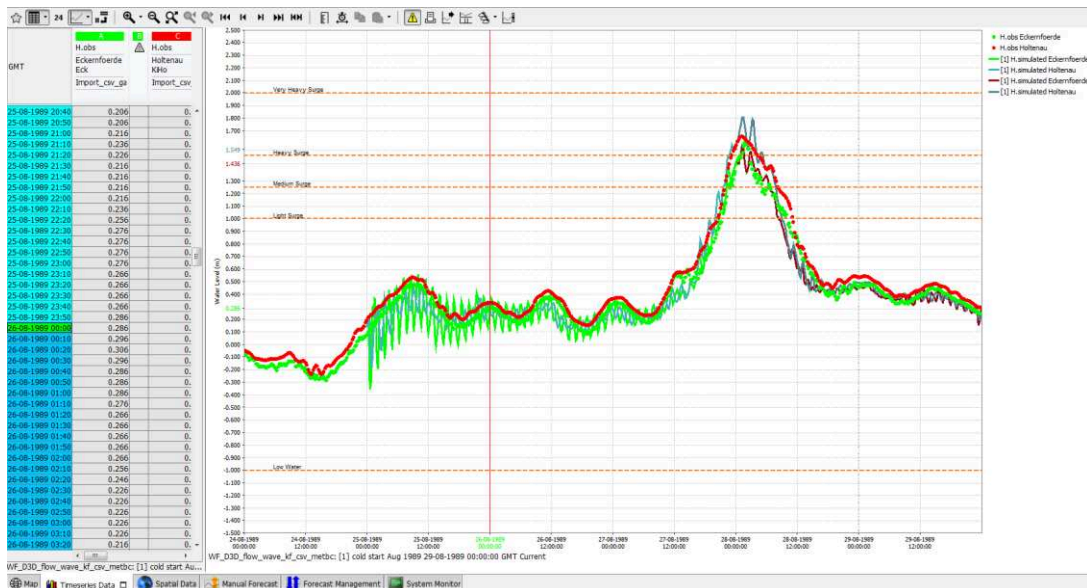
Für die Nutzung des von Deltares für den Küstenbereich zu erweiternde Frühwarnsystems FEWS (Werner et al. 2013) werden ein hydronumerisches Modell auf der Basis des Verfahrens DELFT3D (Stichting Deltares 2014, 2011) und ein Strandmodell auf der Basis von XBEACH (Nederhoff 2015) aufgebaut. Das System FEWS wird hierzu auf einem PC der BAW installiert werden, auf dem bereits das Verfahren DELFT3D installiert ist. Mehrere historische Ereignisse werden zum Testen und Anpassen des Systems gerechnet. Dazu werden die Eingangsdaten geeignet aufbereitet, so dass der operationelle Betrieb des Systems nachempfunden werden kann.

In Arbeitspaket 5 werden die in Arbeitspaket 2 und 3 entwickelten Werkzeuge auf die Fallstudienregion systematisch angewendet.

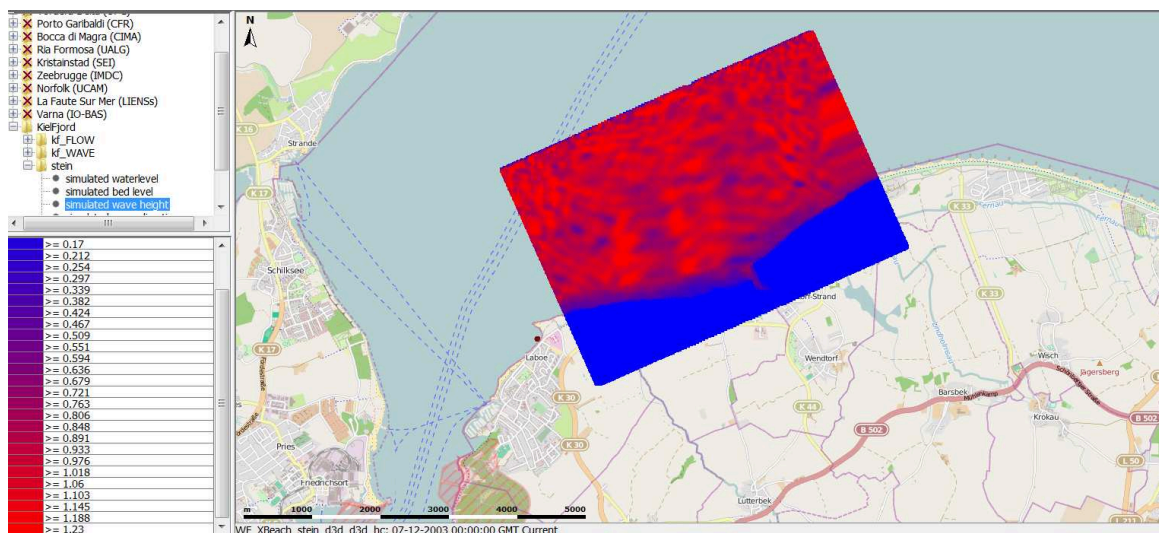
### 3 Ergebnisse

Im Berichtsjahr wurden die folgenden Ergebnisse erzielt:

Für Arbeitspaket 3 wurde das hydrologische- Modell zur Ermittlung von Wasserständen und Wellenparametern für die Fallstudienregion verbessert und innerhalb des Frühwarnsystems FEWS anhand mehrerer Sturmhochwasser validiert (Bild 1). Ein hochauflösendes Modell des Küstenabschnitts von Stein bis Wendtorf auf der Basis des Modellverfahrens XBEACH wurde aufgebaut und in das FEWS-System integriert (Bild 2). Dieses Modell soll der Berechnung der Wellenwirkung und der Erosion in diesem Küstenabschnitt dienen. Es wurden die Eingangsdaten für insgesamt 26 Sturmhochwasser aufbereitet, die in der Datenbank aus dem Arbeitspaket 1 (RISC-KIT 2015) aufgelistet sind. Für das Arbeitspaket 4 wurden Vorschläge zur Risikominimierung erarbeitet. Unter anderem wurde eine vom Wasserstand unabhängige Methode der Vertäuerung von Kleinfahrzeugen in Sportboothäfen vorgeschlagen. Es wurde ein „Bayesian Network“-Modell aufgestellt, durch welches die Wirkung von Maßnahmen innerhalb des FEWS-Systems getestet werden kann.



**Bild 1:** Validierung des hydrodynamischen Modells für das Sommerhochwasser vom 27./28. August 1989 anhand der Pegel Holtenau und Eckernförde.



**Bild 2:** Signifikante Wellenhöhe für das Dezemberhochwasser 2003, modelliert mit XBEACH und visualisiert über das FEWS-System.

Es fanden zwei „RISC-KIT Status Meetings“ in Berlin (Juni) und Brüssel (Oktober) statt. Hier wurden



die erreichten Projektziele vorgestellt und die folgenden Projektabschnitte organisatorisch besprochen. Zum Herbst-Meeting wurden ausgewählte Endnutzer aus den Fallstudienregionen eingeladen. Aus der Fallstudienregion Kieler Förde nahm der Leiter der „Sporthafen Kiel GmbH“ als Endnutzer teil. Mit den Endnutzern wurden die bereits erzielten Arbeitsergebnisse erörtert.

Zur Schulung der Projektpartner wurden drei Workshops zur Verbesserung des Frühwarnsystems sowie zur Vorbereitung des Arbeitspaketes 5 durchgeführt, an denen jeweils ein Mitarbeiter der BAW teilnahm.

Im Rahmen der Vortragsveranstaltung „Hydrologisches Gespräch“ wurde am Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume das Projekt RISC-KIT im Bezug zur Fallstudienregion vorgestellt (Seiß 2015).

Im Rahmen einer Projektarbeit wurde ein Verfahren entwickelt, um das Sachschadensrisiko auf nicht durch Hochwassereinrichtungen geschützten Flächen quantitativ in Abhängigkeit vom zu erwartenden Maximalwasserstand abschätzen zu können (Gerull 2015).

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Für das Arbeitspaket 3 wurde ein auf dem Verfahren XBEACH basierendes Strandmodell in das FEWS integriert. Das Arbeitspaket 4 wird begleitend unterstützt werden. Die Phase 1 der Tests des CRAF-Tools („Coastal Risk Assessment Framework“) wurde im Dezember abgeschlossen. Die Tests des Frühwarnsystems wurden begonnen. Für diese Tests stehen jetzt Eingangsdaten für 26 Hochwasserszenarien zur Verfügung.

2016: Im Frühwarnsystem FEWS werden die Simulationen zum Test des Systems im Stand-Alone-Betrieb durchgeführt und dabei auch die Wirkung der vorgeschlagenen Maßnahmen kontrolliert. Die vom Wasserstand unabhängige Vertäuerung soll als Prototyp installiert werden und über eine Saison hinweg begleitet werden.

Die Status-Meetings 2016 werden in Faro (Portugal) und Varna (Bulgarien) stattfinden.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2017.

#### 5 Literatur

- Gerull, H.: Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Durchführung einer Risikoanalyse für einen Strandabschnitt mit touristischer Nutzung am Beispiel der Strandkorbvermietung in deutschen Ostseebädern. Projektarbeit. Technische Universität Hamburg Harburg, Hamburg, 2015.
- Nederhoff, K.: XBeach Manual. Deltares, 145 p., 2015.
- Neemann, V.: Beschreibung des Sommerhochwassers an der westlichen Ostseeküste von Schleswig-Holstein am 28.08.1989 mit Vergleich anderer Hochwasser. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (ed.): Gewässerkundliches Jahrbuch 1989. 2-14, 1994.
- RISC-KIT: Storm Impact Database for the Case Study Sites. RiscKit tool. RISC-KIT Consortium, <http://risckit.cloudapp.net/risckit/#/map>, last visited: 21.01.2015.
- Seiß, G.: Bewertung des Gefahrenpotentials von Sturmhochwassern in der Region Kieler Förde. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, 27 p., 2014.
- Seiß, G.: Risikominimierungsstrategien an Europäischen Küsten. EU-Projekt RISC-KIT in der Fallstudienregion Kieler Förde. Vortrag, Hydrologisches Gespräch, Flintbek, 08.05.2015.
- Stichting Deltares (ed.): Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN. 2011.
- Stichting Deltares (ed.): Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Delft, 2014.
- Werner, M.; Schellekens, J.; Gijsbers, P.; van Dijk, M.; van den Akker, O. and Heynert, K.: The Delft-FEWS flow forecasting system. In: Environmental Modelling & Software, Vol. 40, 65-77, doi: 10.1016/j.envsoft.2012.07.010, 2013.

#### 6 Veröffentlichungen

Seiß, G.: Risikominimierungsstrategien an Europäischen Küsten. EU-Projekt RISC-KIT in der Fallstudienregion Kieler Förde. Vortrag, Hydrologisches Gespräch, Flintbek, 08.05.2015.

## Integration D-Flow

**Netzplan-Nr.:** A39550370221

**Projektleiter/in:** Dr.-Ing. A. Sehili, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** aissa.sehili@baw.de

## 1 Problemdarstellung und Ziel

### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Das mathematische Verfahren Delft3D wird seit 2005 in der BAW-DH eingesetzt. Mit Delft3D können Hydrodynamik und Transport gelöster sowie suspendierter Substanzen, morphologische Änderungen, Seegang sowie verschiedene Wasserqualitäts-Prozesse simuliert werden. Delft3D wird parallel zu den mathematischen Verfahren UNTRIM und UNTRIM<sup>2</sup> (mit SubGrid) eingesetzt. Die genannten Methoden bilden das Rückgrat praktisch aller für die WSV in Bezug auf Fragestellungen an den Seeschiffahrtsstraßen in der BAW durchgeführten Untersuchungen.

Im Gegensatz zu UnTRIM und UnTRIM<sup>2</sup>, die mit unstrukturierten orthogonalen Gitternetzen genutzt werden, kann Delft3D nur auf strukturierten, krummlinig-orthogonalen Gitternetzen arbeiten. Dies stellt für die geometrisch komplexen Küsten-, Ästuar- und Hafengebiete einen Nachteil dar, da die Erstellung geeigneter Netze nicht immer möglich, oder nur mit sehr großem Aufwand möglich ist.

Seit einigen Jahren arbeitet Deltares (vormals Delft Hydraulics) an einem Nachfolgemodell für Delft3D. Der Arbeitsname ist D-Flow FM. Im Gegensatz zu Delft3D kann D-Flow FM auch auf einem unstrukturierten Gitternetz eingesetzt werden. Des Weiteren wird der Code von D-Flow FM in 2014 für ausgewählte Testusers als Open Source zur Verfügung gestellt. Hierdurch können erforderliche Anpassungen oder Erweiterungen durch Mitarbeiter der BAW und von Dritten, z. B. Universitäten, durchgeführt und der Gemeinschaft der D-Flow FM Anwender zur Verfügung gestellt werden. Es ist zu erwarten, dass D-Flow FM eine weite Verbreitung, intensive Anwendung und rasche Weiterentwicklung erfahren wird.

### 1.2 Bedeutung für die WSV

Der parallele Einsatz unterschiedlicher mathematischer Verfahren (Multi-Modell-Ansatz) für dieselbe Fragestellung, z. B. einer Fahrrinnenanpassung, verbessert die Sicherheit der mit mathematischen Verfahren erstellten Prognosen.

### 1.3 Untersuchungsziel

Das in der BAW-DH eingesetzte mathematische Verfahren Delft3D soll durch D-Flow FM ersetzt werden. Hierbei ist D-Flow FM insbesondere mit den in der BAW-DH standardmäßig genutzten Methoden des Pre- und Postprocessing zu verknüpfen. Einheitlich soll das Dateiformat NetCDF in Kombination mit dem CF Metadatenstandard benutzt werden.

- Erfahrungsaustausch (**WP1**):
  - BAW-intern mit z. B. Fr. R. Patzwahl;
  - Extern mit Mitarbeitern von Deltares, z. B. Hr. F. Platzek.
- Installation der Software, Compilation, Test (**WP2**).
- Vorab-Erprobung „as is“ für die Ästuarie Elbe, Jade-Weser und Ems (**WP3**):
  - Konversion vorhandener Gitternetze;
  - Betrieb mit vereinfachten Randbedingungen;
  - Prüfen der Ergebnisse, Visualisierung.
- D-Flow FM Schnittstellen anpassen an (**WP4**):
  - Import von Anfangswerten aus BAW-Dateien, z. B. CF NetCDF;
  - Import von Randwerten aus BAW-Dateien, z. B. CF NetCDF;
  - Ausgabe der Simulationsergebnisse an
    - Einzelpositionen, auf
    - Profilen, im

- Gesamtgebiet  
in BAW-Dateien, z. B. CF NetCDF.
- Verknüpfung und Erprobung mit Pre- und Postprocessing der BAW (**WP5**):
  - Gitternetzzeugung / -Konversion mit (Programm JaNET);
  - Analyse der Berechnungsergebnisse (Programm NCANALYSE);
  - Visualisierung der Berechnungsergebnisse (Programme NCPLOT, DAVIT).
- Funktions-Test für ein Ästuar (Elbe, Jade-Weser oder Ems) (**WP6**):  
Diese Erprobung sollte möglichst parallel zum Einsatz von z. B. UnTRIM in einem laufenden WSV-Projekt erfolgen. Die korrekte und zuverlässige Funktionsfähigkeit von D-Flow in Zusammenspiel mit BAW-Programmen des Pre- und Postprocessings ist zu demonstrieren. Unterschiede in den Ergebnissen von z. B. UnTRIM und D-Flow sind zu dokumentieren und zu bewerten.
- Dokumentation (**WP7**)
  - Examples-Bereich von PROGHOME;
  - BAWiki.
- Information und Schulung potentieller BAW-Anwender (**WP8**).
- Veröffentlichung (**WP9**).  
Insofern interessante Ergebnisse erzielt wurden, sollen diese auf internationalen Tagungen oder (besser) in einem anerkannten internationalen Journal veröffentlicht werden.

Das Untersuchungsziel ist die Berechnung der veränderten Hydrodynamik aufgrund der Querschnitts-verblockung an der freien Wasseroberfläche durch ein Schiff.

Dazu soll im HN-Modell UnTRIM die SubGrid-Technologie auf die freie Wasseroberfläche übertragen werden, so dass eine dynamische Verblockung der Wasseroberfläche im Modell als eine weitere Randbedingung mit berücksichtigt werden kann.

## 2 Untersuchungsmethoden

Numerische Modellierung. Programmierung.

## 3 Ergebnisse

Nach der anfänglichen Test-Phase des Systems (Aufbau, Funktionalitäten und theoretischen Grundlagen), wurde die erste Validierungssimulation mit einem Szenario „mittleren Verhältnisse“ des Elbe-Ästuars im Sommer 2006 durchgeführt. Bild 1 zeigt einen Abschnitt des Elbe-Modells im Bereich Cuxhaven. Auf dem Weg der Kalibrierung wurden zunächst die Rand- und Initialbedingungen in einem DFlow FM tauglichen Format bereitgestellt. Gleichzeitig wurden die parallelen MPI-Läufe des rechenintensiven Systems vorbereitet. Ein wichtiger Kalibrierungsparameter war die Bestimmung der Sohlenhöhe im Berechnungspunkt der Geschwindigkeit mit ungleichmäßiger Wassertiefe. In 2D Modellen ist hierfür die vollständige Methode die 2D analytische Conveyance.

Umfangreiche Systemstudien und Sensitivitätstests auch anhand von Vergleichen mit UnTRIM wurden durchgeführt. Dadurch konnten diverse Parameter ermittelt werden.

Bild 2 zeigt einen Vergleich von Ergebnissen am Pegel St.Pauli zwischen DFlow FM und Messungen für das Szenario mit mittleren Verhältnissen im Juli 2006.

Die komplette Studie wurde auf den Delfter Software Tagen im Rahmen des Symposiums „New Generation Hydro Software“ im November 2015 in Delft sowie im Rahmen der TV12 Reihe der BAW im Dezember 2015 vorgestellt.

Ein entscheidender Schritt für die Integration von DFlow FM in die BAW Entwicklungs- und Produktionsumgebung war die Möglichkeit, Rechnungen auf dem SGI ICEx Cluster zu starten. Dafür wurde die Linux-Version installiert. Das Programm konnte danach auf dem Cluster in intensiver paralleler Form zum Laufen gebracht werden. Die erzielten Beschleunigungen (Speedup) sind in Bild 3 dargestellt.



Bild 1: Abschnitt des Elbe Models an der Mündung. Gezeigt wird das knotenbasierte unstrukturierte DFlow FM Gitternetz und die unterliegende Bathymetrie.

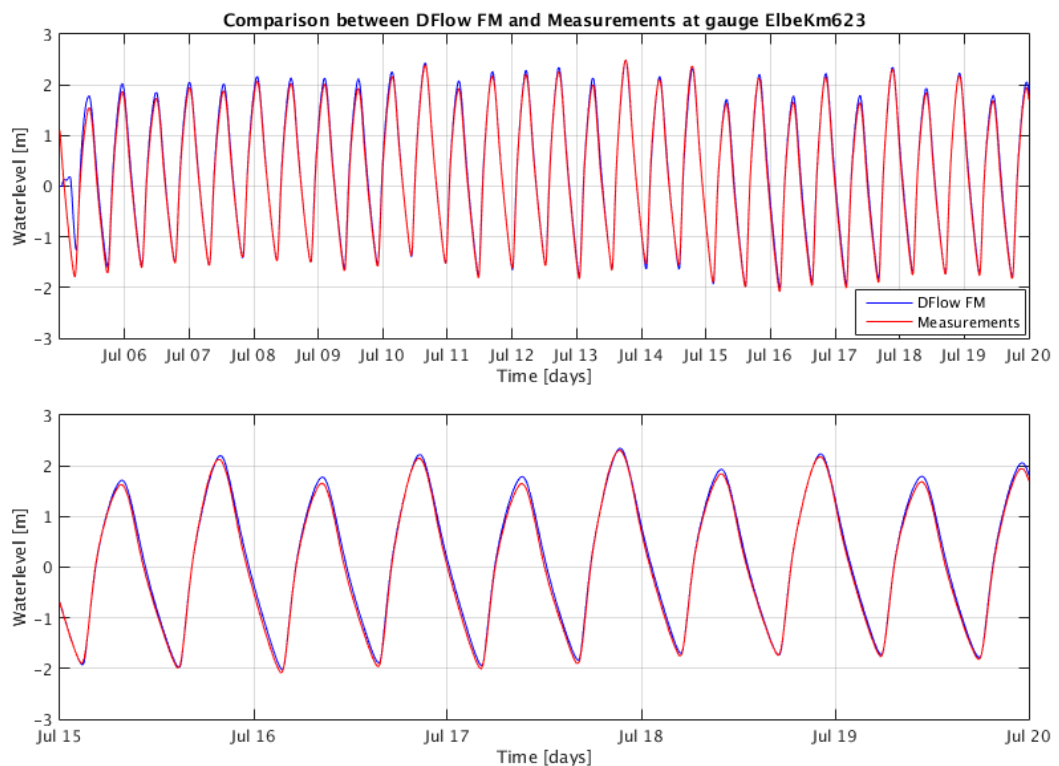


Bild 2: Vergleich der Ergebnisse und Messungen des Wasserstandes zwischen DFlow FM und dem Szenario „mittleren Verhältnisse“ im Juli 2006 am Pegel Hamburg St.Pauli. Oben: 2 Wochen Ergebnisse. Unten: letzte 5 Tage der Simulation.

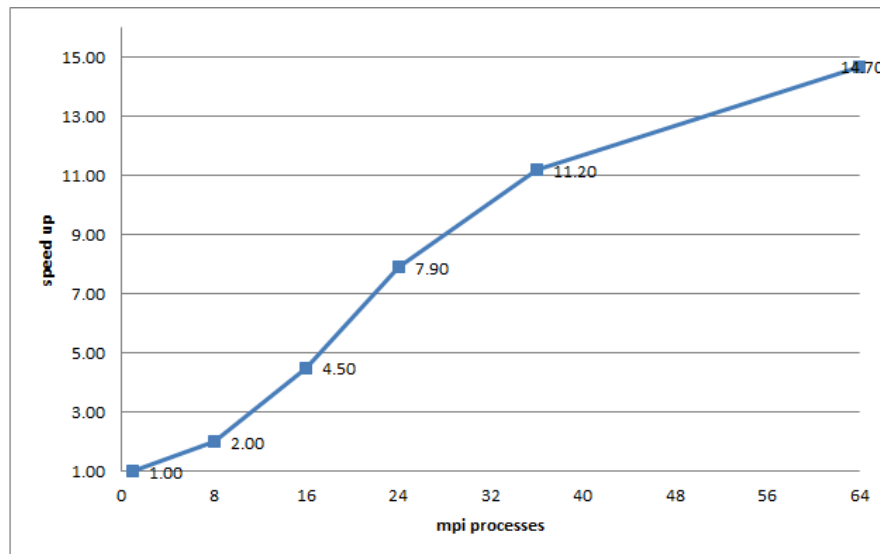


Bild 3: Numerische Performanz (Speedup) von DFlow FM auf dem BAW SGI ICEX Cluster für das Szenario „mittleren Verhältnisse“ im Juli 2006.

DFlow FM steht weiterhin in Entwicklung. Dabei werden im Laufe dieser Entwicklungen neue Versionen freigegeben. Dies bedeutet, dass eine fortwährende Überprüfung der erzielten Ergebnisse notwendig ist. Im Kalibrierungs- und Validierungsprozess wird nun das Szenario der Sturmflut von November 2006 untersucht. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die Winddaten, wie sie bei uns konvertiert und in DFlow FM benutzt werden, nicht zielführend sind. Um die Entwicklung eines weiteren Konvertierungsprogramms für die atmosphärischen Daten zu vermeiden, wird an einem Entwurf eines generischen Konzeptes für den Import von atmosphärischen Daten gearbeitet.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016: **WP4, WP5** und **WP6**.

2017: **WP5, WP6, WP7** und **WP8**.

2018: **WP7, WP8** und **WP9**.

Laufzeit des Vorhabens: 2014 bis 2018.

#### 5 Literatur

- Kernkamp HWJ, van Dam A, Stelling GS and de Goede ED (2011) efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf. *Ocean Dynamics* 61(8): 1175–1188.
- Kleptsova, O., G. S. Stelling and J. D. Pietrzak, 2010. “An accurate momentum advection scheme for z-level coordinate models.” *Ocean Dyn.* 60 (6): 1447–1461.
- Kramer SC and Stelling GS (2008) a conservative unstructured scheme for rapidly varied flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 58(2): 183–212.
- Donchyts, G. · Baart, F. · Van Dam, A. · De Goede, E. · Icke, J. · Putten, H. Next Generation Hydro Software. HIC 2014: 11th International Conference on Hydroinformatics, New York, USA, 17-21 August 2014

#### 6 Veröffentlichungen

- Sehili A. Developing a hydrodynamical model for the Elbe Estuary using Delft3D Flexible Mesh. Next Generation Hydro Software Symposium 2015. Delft, Netherlands, 3-4 November 2015.



## **RichWPS - Effizientere Nutzung von Geodaten mit Web Processing Service**

**Netzplan-Nr.:** A39550670201

**Projektleiter:** Dr.-Ing. R. Lehfeldt, Dienststelle Hamburg, Geschäftsstelle KFKI

**E-Mail:** rainer.lehfeldt@baw.de



### **1 Problemdarstellung und Ziel**

Web Processing Services (WPS) stellen ein wesentliches Konzept web-basierter Geodaten-Infrastrukturen dar. In dem vom BMBF geförderten Projekt RichWPS (01IS12041C) wurden sie für Pilotanwendungen der BAW anhand von datenaufwändigen Simulationskomponenten praxistauglich konkretisiert und erweitert. Die Ergebnisse wurden in die Deutsche Marine Dateninfrastruktur MDI-DE integriert und gewinnen im Rahmen der Erfüllung von EU-Richtlinien immer mehr an Bedeutung.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Geodaten bzw. Daten mit Orts- und Raumbezug sind für vielerlei Zwecke (öffentliche Verwaltung, Wissenschaft, Geomarketing, Verkehrsplanung, -steuerung und -logistik, Energieerzeugung und -versorgung, Tourismus u.v.m.) wichtig. Sowohl verfügbare Daten als auch innovative Ideen zu deren Nutzung werden in den kommenden Jahren mit Sicherheit einen Boom erfahren, befeuert durch Trends wie beispielsweise die explosionsartig wachsende Nutzung mobiler Endgeräte mit GPS und Internetzugang (Smartphones, Tablets) für die mobile Datenerzeugung und -nutzung, die Veröffentlichungspflichten und Open Data Initiativen in der öffentlichen Verwaltung oder die internationalen Großinitiativen zur Erdbeobachtung (COPERNICUS, <http://www.copernicus.eu>).

Die Voraussetzung für eine breite Nutzung von Geodaten und für interoperable Geodateninfrastrukturen (GDIs) ist die Verwendung offener Standards für Daten- und Metadaten-Modelle, für Kommunikationsarchitekturen und -protokolle. Die Standards des Open Geospatial Consortium (OGC), zusammen mit den Normen der ISO, schaffen die Voraussetzung für moderne und zukunftssichere Geodateninfrastrukturen. Mit der europäischen Geodateninitiative INSPIRE (<http://inspire.ec.europa.eu/>) werden sie zudem Grundlage für den überregionalen und internationalen Austausch von Geodaten in der öffentlichen Verwaltung.

Mittlerweile sind die OGC-Standards zur Informationsbereitstellung im Web (die sog. Datendienste, wie Web Feature Service (WFS) für Geodatenzugriff und Web Map Service (WMS) für den Landkartenzugriff) stabil und in der praktischen Nutzung weit verbreitet. Der Web Processing Service (WPS) zum Anbieten und Nutzen komplexer räumlicher Verarbeitungsprozesse und Analysen im Internet ist dagegen noch weniger verbreitet. Der WPS Standard beschreibt, wie räumliche Verarbeitungsprozesse über eine Web-Schnittstelle angesprochen werden können. Solche Verarbeitungsprozesse umfassen jegliche Algorithmen, Berechnungen oder Modelle, die räumlich referenzierte Vektor- oder Rasterdaten verarbeiten.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Ergebnisse des Verbundvorhaben RichWPS leisten bei der BAW einen Beitrag zu Zielsetzungen, die innerhalb der Verwaltung im Kontext von „Datenmanagement und Qualitätssicherung“ sowie bei der Umsetzung politisch gesetzter Anforderungen an die Bundesrepublik verfolgt werden.

Die nationale Umsetzung der europäischen Geodatenrichtlinie INSPIRE wird durch viele einzelne Fördermaßnahmen gestützt, die auch dem Aufbau von Geodateninfrastrukturen und damit dem Zugriff auf Geodaten dienen. Die für INSPIRE vorgesehene innovative Technologie hat besonders im Bereich „big data“ und verteilter Datenprozessierung noch große Hürden zu nehmen. Die BAW und das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) verfolgen seit Ende der 90er Jahre mit einer Kette von Vorhaben – NOKIS, NOKIS++, MDI-DE – und eigener Initiative den Aufbau einer Geodateninfrastruktur, die sowohl den Anforderungen von INSPIRE entspricht und insbesondere für küsten- und meeresbezogene Aufgabenstellungen standardisierte Komponenten einsetzt.

Von Seiten der europäischen Umweltrichtlinie MSRL (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie, <http://www.meeresschutz.info/>) wird explizit die Nutzung von INSPIRE-Techniken gefordert. Die Übertragung eines Bewertungsverfahrens der WRRL (Wasserrahmenrichtlinie, <http://www.wasserblick.net>) auf ein weitgehend automatisiertes Verfahren, das auf INSPIRE-Techniken beruht, zeigt die Möglichkeiten von RichWPS. Dabei spielt der Zugriff auf heterogene, verteilte Datenbestände eine wesentliche Rolle. Dieser basiert zunehmend auf Format- und Protokoll-Standardisierungen des OGC, die in Anwendungen von RichWPS eingebunden wurden. Die BAW spielt eine wichtige Rolle bei der Ergebnisverbreitung und Projektvernetzung für wasserwirtschaftliche Planungen und Analysen und unterstützt damit die Zusammenarbeit mit der WSV.

### 1.3 Untersuchungsziel

Ziel des Projekts RichWPS war es, die Standards des Open Geospatial Consortium für WPS praxistauglicher zu konkretisieren, zu erweitern und softwaretechnisch besser zu unterstützen. Dazu wurden eine benutzerfreundliche Modellierungsumgebung entworfen und prototypisch umgesetzt; innovative WPS-Server und –Klienten realisiert; Best-Practice Implementierungen mit konkreten Geodaten-Verarbeitungsprozessen aus der öffentlichen Verwaltung geschaffen und daran die technischen Projektansätze validiert. Da die WPS-Konzepte ihrer praktischen Umsetzung und Verbreitung weit voraus sind, war es Ziel des Vorhabens, die zeitgemäße Weiterentwicklung und breitere Nutzung von WPS zu unterstützen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Forschungsverbund wurde eine Architektur entworfen und exemplarisch implementiert, die die wesentlichen Systembausteine eines RichWPS-Dienste-Systems identifiziert und initiale Beschreibungen der Schnittstellen zwischen den Komponenten realisiert. Die BAW untersuchte die Anforderungen für WPS-Nutzungsszenarien und –werkzeuge, setzte Beispielprozesse prototypisch um, und validierte und bewertete aus Benutzersicht die technischen Konzepte und Prototypen. Dabei vertrat die BAW die Perspektive einer großen und verteilten, stark vernetzten Bundesoberbehörde.

Die disy Informationssysteme GmbH arbeitete als Konsortialführer und etabliertes Softwareunternehmen in der Verarbeitung von Geodaten mit der Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik der Hochschule Osnabrück (HS-OS) zusammen, welche die anwendungsorientierte Forschung zum Software-Engineering beisteuerte. Zwei Pilotanwender aus der öffentlichen Verwaltung, die BAW und der schleswig-holsteinische Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz (LKN) stellten sicher, dass sich die Technik- und Methodenentwicklungen von disy und HS-OS an den Bedürfnissen und Möglichkeiten von Praktikern orientierten.

## 3 Ergebnisse

Der gemeinsame Abschlussbericht (Abecker, A. et al., 2015) ist auf dem [MDI-DE Portal](https://www.mdi-de.org) (<https://www.mdi-de.org>) verlinkt und über die Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB) verfügbar. Er beschreibt im Wesentlichen die Entwicklung der Software-Architektur für Web Processing Services. Die aus Sicht des Praxispartners BAW für weitere Arbeiten wichtigen Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

### 3.1 Steuersprache ROLA

Mit Hilfe einer neu entwickelten Steuersprache ROLA (RichWPS Orchestration Language) kann von einem Fachexperten ein Verarbeitungsprozess beschrieben werden, der auf verteilte Dienste unterschiedlicher Anbieter (OWS (OGC Web Services), insbesondere WPS und WFS) zugreifen und diese auf einem RichWPS Server zusammen mit weiteren Verarbeitungsmodulen in einer Orchestration Engine zu einem neuen WPS aufbereiten kann. Dieser so fixierte Workflow kann anschließend von Nutzern in eigenen Klienten als WPS abgerufen werden.

### 3.2 ModelBuilder

Herzstück dieser Software-Architektur ist der sogenannte ModelBuilder. Dieser bietet die verfügbaren Dienste und Prozesse an, die über einen SemantikProxy als Vermittler zu den verteilten Quellsystemen verwendet werden können. Im zentralen Modellierungsfeld wird der beabsichtigte Workflow mit Hilfe graphischer Elemente modelliert und hierbei im Hintergrund mit der ROLA in einem Ausführungsskript dokumentiert.

### 3.3 Prototypanwendungen bei der BAW

Die Bild 1 zeigt den Klienten für eine der Prototypanwendungen bei der BAW. Bei dem hier abgebildeten Verarbeitungsprozess können Wasserstandswerte von Pegelstationen, die über das integrierte Beobachtungs- und Modellierungssystem COSYNA im Helmholtz-Zentrum Geesthacht verfügbar sind, mit Ergebnissen aus numerischen Simulationen der BAW für die Deutsche Bucht verglichen werden. Derzeit werden die Wasserstands-Ganglinien an den ausgewählten Positionen für einen auszuwählenden Zeitraum angezeigt sowie ein Plot ihrer Differenzen und ihre Fourier-Spektren angeboten.

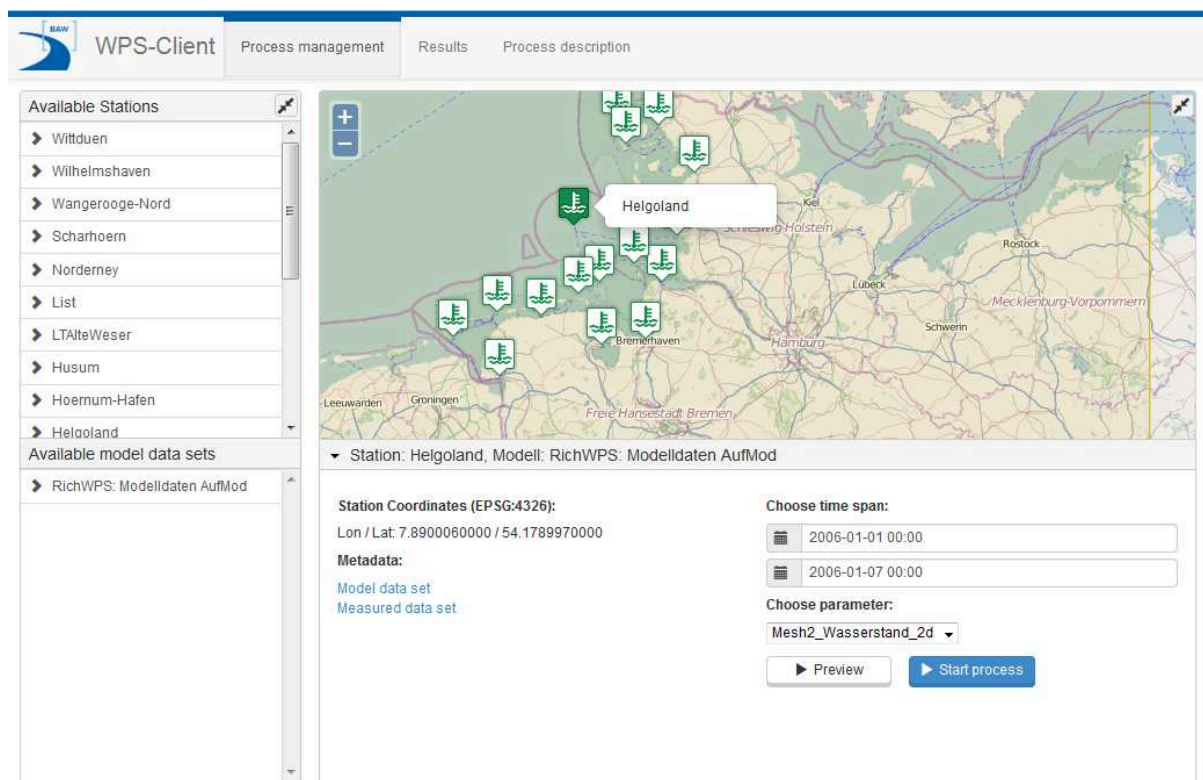


Bild 1: Interaktive Benutzeroberfläche für das Szenario Datenvergleich Feldmessung (COSYNA) und Modellrechnung (BAW)

### 3.4 Web-Clients für mobile Endgeräte

Die Entwicklung eines RichWPS Web-Clients für mobile Endgeräte geht davon aus, dass viele Geschäftsprozesse, die mit Geodaten zu tun haben, Aufgaben enthalten können, die mit Vor-Ort-Terminen verbunden sein können. Bei solchen Ortsterminen kann es sehr nützlich sein, von unterwegs mit einem mobilen Endgerät (Tablet) auf Geodaten oder Geodatenverarbeitungsprozesse in der Zentrale zuzugreifen. Allerdings kann die mobile Geodatennutzung über mobile Netzwerke gerade in entlegenen Gebieten häufig mit Problemen verbunden sein: Verbindungsabbrüchen, geringen Bandbreiten, höheren Paketumlaufzeiten, usw. Unter diesen Voraussetzungen war es ein Ziel, Methoden und Techniken zu untersuchen, wie sich ein mobiler WPS-Client intelligent an die wechselnde Situation anpassen kann.



### 3.5 Metadaten für Prozessketten

Aus der Sicht von RichWPS-Nutzern für Dokumentationen im Rahmen von Berichtspflichten fehlt zu der mit ROLA dokumentierten Prozessierung von Geodaten noch die automatisierte Generierung von Metadaten, die zu dem resultierenden WPS als semantische Dokumentation gehören. Ein noch ungeklärtes Problem ist die ISO-kompatible Modellierung der Metadaten für die Prozesskette. In den bestehenden Schemata für die Beschreibung von Diensten und Datensätzen ist eine Beschreibung von Dienstketten, die nach dem Eltern-Kind-Prinzip aufgebaut sind, nicht vorgesehen. Da Prozessketten theoretisch aus beliebigen Kombinationen vorhandener Prozesse gebildet werden können, ist es sinnvoll, Prozesskettenbeschreibungen automatisiert zu generieren. Derzeit müssen diese Informationen noch per Hand erzeugt werden.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Vorhaben wurde im Zeitraum 01.01.2013 bis 31.12.2014 und einer anschließenden kostenneutralen Verlängerung bis zum 31.03.2015 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms KMU-innovativ gefördert. Es wurde zusammen bearbeitet von

- disy Informationssysteme GmbH, Karlsruhe,
- Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Osnabrück,
- Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg,
- Landesbetrieb Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, Tönning.

Die BAW war insgesamt 21 Monate beteiligt und hat folgendes Arbeitsprogramm erfüllt:

- Definition der Anwendungsszenarien „Vergleich von Modell- und Messdaten“ und „Vergleich von Profildaten“ mit Beschreibung des Workflows für die Dienste basierte Umsetzung und der benötigten Algorithmen.
- Bestimmung von modularen Prozess-Komponenten für die BAW-Anwendungsszenarien.
- Technische Konzeption und Umsetzung der Pilotanwendungen mit Unterstützung durch die Projektpartner.
- Entwicklung eines dynamischen Web-Clients zur Kommunikation mit den verteilten Datenquellen.
- Implementierung eines Sensor Observation Service (SOS) für Zeitreihen, sowie eines Web Coverage Service (WCS) für gerasterte Profildaten, um die gemessenen und modellierten Datensätze in einer Geodateninfrastruktur verfügbar zu machen.
- Bereitstellung von Teildatensätzen direkt aus NetCDF-Dateien mit SOS bzw. WCS über das Internet in einem standardisierten XML-Format (Observations&Measurements, O&M, bzw. Geographic Markup Language, GML).
- Implementierung, Integration und Betrieb der RichWPS Tools auf dem Infrastrukturknoten der BAW für die MDI-DE (Marine Dateninfrastruktur Deutschland).

Der Projektfortschritt wurde durch halbjährliche Zwischenberichte an den Projektträger Softwaresysteme und Wissenstechnologien (PT-SW) im DLR dokumentiert.

Abschlussbericht wird in 2016 erstellt.

Laufzeit des Vorhabens: 2013 bis 2015.

### 5 Literatur

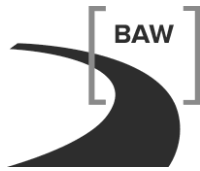
Abecker, A., Kohlus, J., Lehfeldt, R., Roosmann, R. (Hrsg.) (2015): RichWPS - Eine Software-Umgebung für Fachanwender zur effizienteren Nutzung von Geodaten mit Web Processing Services, 2015.

Wosniok, C., Bensmann, F., Wössner, R., Kohlus, J., Roosmann, R., Heidmann, C., Lehfeldt, R. (2014): Enriching the Web Processing Service. In: Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2014, Jg. 16, 13365. 2014.

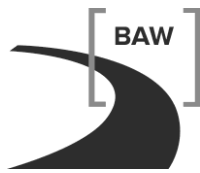
Wosniok, C., Lückert, M., Lehfeldt, R., Bensmann, F., Roosmann, R. (2014): Standardized Web Processing of Hydro-Engineering Operations. In: Lehfeldt, R. und Kopmann, R. (Hrsg.): ICHE 2014. Hamburg, 1091-1098. 2014.

### 6 Veröffentlichungen

-/-



## **II. Neue FuE-Vorhaben in 2015**



## Herstellung von Dränbetonpfählen

**Netzplan-Nr.:** A39520270004

**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Herten, Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** markus.herten@baw.de

## 1 Problemdarstellung und Ziel

### 1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Baumaßnahmen an Bundeswasserstraßen stellen oft hohe Anforderungen an das Baugrubenkonzept. Große Tiefen und hohe Grundwasserstände sowie beengte Platzverhältnisse und geringe zulässige Verformungen insbesondere im Bereich von Bestandsbauwerken dominieren die Bauprojekte der WSV. Unter der Voraussetzung, dass eine offene Wasserhaltung im Baufeld realisierbar ist, können Baugruben wasserdurchlässig ausgebildet werden. Mit der Maßgabe den Abtrag hoher Lasten verformungsarm zu ermöglichen, sind Bohrpfahlwände, die in der aufgelösten Form auch durchlässig ausführbar sind, eine wirtschaftliche Lösung. Ihre Herstellung ist in der DIN 4014 bzw. DIN EN 1536 geregelt. Dieser entsprechend ist die Art der Ausfächung im Falle der aufgelösten Bohrpfahlwand frei wählbar. Eine Möglichkeit stellt die Verwendung von Dränbeton als Ausfächung dar. Dieser hat zum einen eine statische Tragfähigkeit und ist außerdem wasserdurchlässig. Letztere Eigenschaft bietet den Vorteil, dass durch eine planmäßige Grundwasserentspannung hinter der Verbauwand das Lastniveau maßgeblich gesenkt werden kann. Auf diese Weise kann der Aufwand für die Herstellung des Verbaus deutlich reduziert und zugleich können wesentliche Kosten eingespart werden. Zudem wirkt der Dränbeton im Gegensatz zu lediglich punktuell entwässernden Dränageschläuchen als Flächenfilter.

Dränbeton ist ein Spezialbeton, der bereits seit vielen Jahren für Fertigteile und auch als Ortbeton insbesondere im Straßenbau zur Entwässerung eingesetzt wird. Die Wirkungsweise beruht auf seinem Aufbau. Im Gegensatz zu Normalbeton nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 sind die Haufwerksporen der groben Gesteinskörnung nicht mit Mörtel ausgefüllt, sondern es ist nur eine ausreichende Menge an Feinmörtel vorhanden, um die Gesteinskörner miteinander zu verkitten. Im Beton verbleiben Hohlräume, die eine Wasserdurchlässigkeit sicherstellen. Mit steigendem Hohlraumgehalt sinkt die Festigkeit des Betons.



*Bild 1: Freigelegte Bohrpfahlwand mit Dränbetonpfählen als Ausfächung*

Die speziellen Anforderungen an den Frischbeton für einen Bohrpfahl stehen im Widerspruch zu den Eigenschaften eines normalen Dränbetons im Ausgangszustand, weshalb differenzierte Einbauverfahren

und Rezepturen erforderlich werden. Aufgrund der im Vergleich zu gefügedichtem Beton wesentlich größeren Oberfläche des Dränbetons, die das gesamte Bauteil durchdringt, kommt dem Widerstand des frischen Betons gegenüber einem Auswaschen des Zementleims bei Einbau unter Wasser eine weitaus größere Bedeutung zu als bei klassischem Bohrpfahlbeton.

In der jüngeren Vergangenheit sollte diese unkonventionelle Verbauart im Rahmen eines Schleusenneubauprojektes zum Einsatz kommen, wobei die Ausführung einer der zu errichtenden Baugrubenwände als überschnittete Bohrpfahlwand mit Dränbetonpfählen vorgesehen war. Im Vorfeld ist eine Probewand errichtet worden. Dabei kam es beim Betonieren der Dränbetonpfähle unterhalb des Grundwasserspiegels zu einer Entmischung von Zementleim und Kies. Nur oberhalb des Grundwasserspiegels konnten die Anforderungen an Durchlässigkeit und Festigkeit des Dränbetons sicher erfüllt werden (Bild 1). Daraufhin musste das Baugrubenkonzept mit entsprechenden Mehrkosten in Millionenhöhe umgestellt werden. Veröffentlichungen aus den 1980er Jahren (beispielsweise Wietek, 1983) zeigen jedoch, dass es grundsätzlich möglich ist, auch unterhalb des Grundwasserspiegels entsprechende Dränpfähle herzustellen.

## **1.2 Bedeutung für die WSV**

Durch eine Vielzahl an Baumaßnahmen, die die Herstellung tiefer Baugruben neben Bestandsbauwerken erfordert, wird die WSV oft mit der Frage nach einem hoch belastbaren, verformungsarmen und zugleich wirtschaftlichen Verbau konfrontiert. Die zumeist eingesetzte Bohrpfahlwand bietet bei wasserdurchlässiger Ausfachung mit Dränbeton unter bestimmten Voraussetzungen die Möglichkeit durch den Abbau des Wasserdrucks aus Grundwasser hinter der Verbauwand die Einwirkungen auf diese zu minimieren, wodurch enorme Kosteneinsparungen beim temporären Verbau möglich werden.

## **1.3 Untersuchungsziel**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll eine geeignete Vorgehensweise aus geotechnischer, bauverfahrenstechnischer und baustofflicher Sicht erarbeitet werden, um Möglichkeiten und Grenzen einer zielsicheren Herstellung von Dränbetonbohrpfählen z. B. als dränierende Elemente von Verbauwänden aufzuzeigen. Dabei soll untersucht werden, welche Faktoren die Funktionstüchtigkeit beeinflussen. Dies betrifft insbesondere die Dränagefähigkeit und die Festigkeit des Betons, aber auch die Interaktion mit den tragenden Bohrpfählen der Bohrpfahlwand. Einen Schwerpunkt stellt die Erörterung und Untersuchung der betontechnologischen Möglichkeiten zur Sicherstellung der aus geotechnischen und bauverfahrenstechnischen Randbedingungen resultierenden Anforderungen an das Gesamtsystem, wie z. B. Einbau ohne und mit Wasserzutritt, dar. Doch auch die Untersuchung alternativer Methoden, wie z. B. der Einsatz von Fertigteilen oder anderer Materialien, soll in die Betrachtungen einfließen.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Vorab wurde in Form eines Sachstandsberichtes der gegenwärtige Entwicklungsstand erörtert und auf aktuelle Entwicklungstendenzen im Bereich Dränbeton im Allgemeinen eingegangen. Erläutert wurden außerdem existierende Prüfverfahren, die in anderen Einsatzbereichen (z. B. Unterwasserbeton, Fertigteile, Straßenbau) zur Prüfung von artverwandten Materialien angewendet werden.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens ist ein Laborprogramm vorgesehen, mithilfe dessen die Eigenschaften ausgewählter Materialzusammensetzungen analysiert und für den Anwendungsfall optimiert werden sollen. Wichtige Eigenschaften sind die Druckfestigkeit, die Durchlässigkeit sowie ggf. die Überprüfung des Eindringens von Normalbeton in den Dränbeton. Geeignete und praxistaugliche Laboruntersuchungsmethoden, bei denen baupraktische Randbedingungen berücksichtigt werden können, sollen erarbeitet oder adaptiert werden.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Erprobung in situ. Auf einer Baustelle soll eine aufgelöste Probewand aus Bohrpfählen mit dränierfähiger Ausfachung hergestellt werden. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf dem Einbauverfahren unterhalb des Grundwasserspiegels. Eine Konzeption von geeigneten Feldversuchen soll die Möglichkeiten aufzeigen, im Nachhinein den Erfolg der Maßnahme und der Betoneigenschaften ggf. anhand zerstörungsfreier Prüfmethode sowie anhand von Bohrkernen zu kontrollieren.

### **3 Ergebnisse**

Im Jahr 2015 erfolgte die Beauftragung der Bergischen Universität Wuppertal in Kooperation mit der Ruhr-Universität Bochum mit der Erarbeitung und Durchführung eines Laborprogramms sowie von Modellversuchen. Ergebnisse hierzu liegen noch nicht vor.

### **4 Arbeitsprogramm und Zeitplan**

2016: Laborversuche mit ausgewählten Materialkompositionen  
2017: Herstellung von Dränpfählen  
2018: Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2018.

### **5 Literatur**

Wietek, B. (1983): Drainageverbau. In: tis - Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau (5), S. 323–327.  
DIN EN 1536:2015-10 (2015): Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bohrpfähle  
DIN EN ISO 4014:2011-06 (2011): Sechskantenschrauben mit Schaft – Produktklassen A und B, aktuelle Ausgabe: 2011-06  
DIN EN 206-1:2001-07 (2001): Beton; Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität  
DIN 1045-2:2008-08 (2001): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Deutsche Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 Beton

### **6 Veröffentlichungen**

-/-



## **Ermittlung charakteristischer Kennwerte in veränderlich festen Gesteinen unter Berücksichtigung des Porenwasserdrucks**

**Netzplan-Nr.:** A39520270005

**Projektleiter:** Ch. Günther, Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

**E-Mail:** christian.guenther@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Veränderlich feste Gesteine wie Tonsteine stehen mit ihrem geotechnischen Verhalten zwischen Lockergestein und Fels. Die Untersuchung nach rein boden- oder felsmechanischen Gesichtspunkten hat sich deshalb als nicht anwendbar erwiesen. Darüber hinaus reagieren veränderlich feste Gesteine empfindlich im Kontakt mit Wasser (Bild 1), was eine störungsfreie Probenahme sowie die anschließende Versuchsdurchführung und Ergebnisinterpretation zusätzlich erschwert. In der Literatur werden verschiedene Mechanismen zur Erklärung des Zerfallsprozesses diskutiert. Diese umfassen die Wirkung von osmotischen Vorgängen in Ton- und Schluffsteinen (Ondrasik und Kopecki, 2014), sogenanntes "air breakage" (Taylor und Spears, 1970), bei welchem komprimierte Porenluft infolge eines schnellen Zutritts von Wasser zu einem Zerfall des Gesteins führt, sowie Spannungsunterschiede durch Differenzen der Saugspannung in unterschiedlich großen Poren (Bönsch, 2006). Darüber hinaus existieren weitere, untergeordnete Theorien zur Zersetzung veränderlich fester Gesteine. Besonderer Forschungsbedarf besteht nach Kanji (2014) im Bereich der Probenahme und bei der Durchführung von Laborversuchen.

Im Rahmen der Probenahme für die Durchführung höherwertiger Versuche wird meist ein Rotationsbohrverfahren mit Dreifach-Kernrohr verwendet. Dabei sollte die Bohrspülung nicht mit dem Gestein in Kontakt kommen. Meist wird Bentonit als Zusatz zur Bohrspülung beigefügt, um den Einfluss des Wassers auf die veränderlich festen Gesteine zu verringern. Nach dem Bohren werden die Kerne in Folie gewickelt bzw. eingewachst. Während des Transports erfolgt die Lagerung der Proben in erschütterungsarmen Kernboxen sowie später in Klimäräumen bzw. -schränken.



**Bild 1:** Zersetzungserscheinungen am Mindener Tonstein infolge des Feucht-Trocken-Wechsels

In der Versuchstechnik ist es üblich verschiedene Indexversuche miteinander zu kombinieren, um die veränderlich festen Gesteine zu charakterisieren (Nickmann, 2007; Merklein, 1982). Zur Bestimmung von Festigkeits- und Steifigkeitsparametern werden oft lediglich empirische Korrelationen verschiedener Parameter verwendet. Eine aktuelle Entwicklung bei höherwertigen Versuchen wie Triaxial- und direkten Scherversuchen stellt die Messung der sog. "small-strain-stiffness" (Steifigkeit im Bereich sehr geringer Deformation) dar. Eine systematische Erfassung des Porenwasserdrucks und dessen Rolle bei der Interpretation der Versuchsergebnisse erfolgt meistens nicht. Wenn der Porenwasserdruck aufgezeichnet wird, erfolgt dies meistens nur bei undrained Verhältnissen.

Bei einem Vergleich von Sieler (2005) ergaben sich zwischen den Ergebnissen bodenmechanischer Scherversuche mit langsamer Vortriebsgeschwindigkeit und Messung des Porenwasserdrucks und felsmechanischen Scherversuchen mit schneller Vortriebsgeschwindigkeit ohne Messung des Porenwasserdrucks für das gleiche Material substantiell verschiedene Parameter.

## **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Rahmen des Neubaus verschiedener Schleusen wie z. B. in Minden, Kriegenbrunn oder Erlangen werden immer wieder Bereiche mit veränderlich festen Gesteinen angetroffen. Eine Fehleinschätzung der Festigkeits- und Steifigkeitsparameter kann zu substantiellen Schäden an Gründungen und Bauwerken und zu Verzögerungen im gesamten Bauablauf führen. Schäden an bestehenden Bauwerken können auch nach der Herstellung nicht ausgeschlossen werden. Durch eine an das Material angepasste Ermittlung dieser Parameter können Unsicherheiten in der Bauphase minimiert und Kosten eingespart werden. Zudem können fundiert ermittelte Kennwerte Eingang in numerische Berechnungen finden und deren Qualität verbessern.

## **1.3 Untersuchungsziel**

Untersuchungsziele sind die Konzeption von geeigneten und praxistauglichen Laboruntersuchungsmethoden für veränderlich feste Gesteine, die eine Messung des Porenwasserdrucks erlauben. Damit sollen charakteristische Kennwerte bei drained Verhältnissen bestimmt und mit den undrained Kennwerten verglichen werden. Dazu wird ein Workflow von der Probenahme bis zur experimentellen Untersuchung der veränderlich festen Gesteine erarbeitet. Dieser beinhaltet die Entwicklung von Probeentnahmetechniken und -aufbereitungen, die zu möglichst ungestörten Proben führen sollen, sowie die Identifikation der Faktoren, die die Probenahme beeinflussen. Zudem soll festgestellt werden mit welchen Versuchen und in welcher Kombination charakteristische Kennwerte an gesättigten und teilgesättigten Proben ermittelt werden können.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Vorab wurde durch eine Literaturstudie der gegenwärtige Wissensstand erarbeitet und aktuelle Entwicklungstendenzen im Themenbereich veränderlich feste Gesteine wurden identifiziert.

Im nächsten Schritt soll ermittelt werden, welcher der drei, unter 1.4 genannten Zerfallsmechanismen als der Maßgebende agiert. Daraus müssen die Schlussfolgerungen für die Probenahme, die Laboruntersuchungen und die Auswertung der Versuche gezogen werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden Proben in-situ mit geeigneten Methoden entnommen, konserviert, transportiert und gelagert. Bei der anschließenden experimentellen Untersuchung im Labor sollen vor allem Versuche an intakten, nicht zersetzten, veränderlich festen Gesteinen durchgeführt werden. Die zu untersuchenden Gesteine müssen zunächst genau charakterisiert werden, um einen Vergleich der Versuchsergebnisse zu ermöglichen. Dazu dienen Indexversuche wie die Bestimmung des Wassergehalts, der Größe des Porenraums und der Mineralzusammensetzung (z. B. per Röntgendiffraktometrie). Die Mikrostruktur der Gesteine kann mittels REM-Aufnahmen erfasst werden. Danach werden undrained und drained höherwertige Laborversuche mit Porenwasserdruckmessungen durchgeführt, um die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitsparameter zu bestimmen.



### 3 Ergebnisse

Im Jahr 2015 wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Diese beinhaltete den Aufbau einer Literaturdatenbank sowie die Bearbeitung der wichtigsten Veröffentlichungen auf dem Forschungsgebiet.

Es wurden erste Versuchsspuren aus der Literatur ausgewertet und verglichen. Hierbei ergaben sich z. T. signifikante Unterschiede zwischen dränierten und undränierten bzw. boden- und felsmechanischen Versuchsmethoden, die besonders die Größe der Kohäsion betrafen, obwohl die Versuche am gleichen Material durchgeführt wurden.

Darüber hinaus wurde eine Bohrempfehlung für die in situ Probenahme an der Schleuse Minden erarbeitet.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015: Literaturrecherche

2016: Probenahme in-situ, Durchführung der Indexversuche. Austausch mit anderen Laboren über Triaxialversuche an Felsproben (ETH Zürich, Universität Halle), Vorversuche

2017: Durchführung des Laborprogramms

2018: Auswertung, Verfassung des Forschungsberichtes

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2018.

### 5 Literatur

- Bönsch, C. (2006): Weathering of partial saturated soft rock. In: van Cotthem, A., Charlier, R., Thimus, J. F., Tshibangu, J. P. (Ed.): Eurock 2006. Multiphysics coupling and long term behavior in rock mechanics, Balkema, S 397-402.
- Kanji, M.A. (2014): Critical issues in soft rocks. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 6, Issue 3, S. 186–195.
- Merklein, I. (1982): Limitierende Faktoren des Trocknungs-Befeuchtungs-Zerfalls überkonsolidierter Tonsteine. Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Tübingen.
- Nickmann, M. (2007): Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter Ingenieurgeologischen Aspekten. Technische Universität München, München.
- Ondrasik, R., Kopecki, M. (2014): Rock Pore Structure as Main Reason of Rock Deterioration. Studia Geotechnica et Mechanica, Volume 36, Issue 1, S. 79–88.
- Sieler, U. (2005): Keuper als geotechnisches Material. In: Moser, M. (Ed.): Veröffentlichungen von der 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, S. 173–177.
- Taylor, R.K., Spears, D.A. (1970): The breakdown of British Coal Measure rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 7, Issue 5, 481–501.

### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Festigkeiten nichtbindiger Böden**

**Netzplan-Nr.:** A39550170390

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. U. Matthiesen, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,  
Referat Geotechnik Nord (K1)

**E-Mail:** ulf.matthiesen@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Das maßgebliche Kriterium zur Dimensionierung von Bauteilen sowie zur Beurteilung von Standsicherheiten ist neben dem Grundwasserstand die Festigkeit, d. h. die Scherfestigkeit und Kompressibilität, der anstehenden Böden. Während bei Festgestein und bindigen Böden (Tone, Schluffe) vornehmlich direkte Untersuchungen an entnommenen Bodenproben im Labor ausgeführt werden, kommen bei nichtbindigen Böden (Sanden und Kiesen) indirekte Verfahren mittels Sondierungen und Korrelationen zur Anwendung.

In der WSV werden die Sondierungen üblicherweise als Drucksondierungen CPT (Cone Penetration Test) ausgeführt, um auf die Festigkeiten und die Schichtenfolge der Böden in situ zu schließen. Wie Untersuchungen und Auswertungen (z. B. Melzer, 1968; Melzer et al., 2008; Lunne et al., 1997) gezeigt haben, ist das Sondierergebnis einer CPT, d. h. der Spitzenwiderstand und die Mantelreibung, abhängig von diversen Eigenschaften des anstehenden Bodens, wie z. B. Kornform, Kornverteilung, Lagerungsdichte, Chemismus und Grundwasserstand. Derzeitige Korrelationen (z. B. DIN EN 1997-2, 2010) gehen auf einige der Parameter ein, insbesondere die Kornverteilung.

Die Datengrundlage zur Herleitung der Korrelationen basiert mitunter lediglich auf oberflächennahen Untersuchungen; die Datenbasis ist gering. Die geringe Grundlage der Herleitung soll durch folgendes Zitat aus der maßgeblichen Norm DIN 4094-1 (2002) verdeutlicht werden: „Die im Folgenden angegebenen Beziehungen sind empirisch aus einer großen Anzahl, zum Teil stark streuender Versuchsergebnisse abgeleitet“. Eine Interpretation durch den Geotechnischen Sachverständigen auf Grundlage lokaler Erfahrungen wird in den Normen empfohlen.

In der norddeutschen Tiefebene stehen regionaltypische nichtbindige Böden in weiten bauwerksrelevanten Bereichen an. Zur realitätsnahen Beurteilung der Festigkeiten dieser Böden sind folglich eigene Korrelationen aufzustellen. Hierbei ist in die unterschiedlichen Ablagerungsmilieus, wie z. B. marine Sedimente, glaziale Schmelzwassersande und Beckensande zu unterscheiden.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Nur durch eine zutreffend ermittelte Scherfestigkeit und Kompressibilität des Baugrundes können Bauteile, wie Uferwände, Baugrubenwände, -sohle, Rückverankerungen, Pfähle, etc. gleichzeitig wirtschaftlich und sicher dimensioniert werden. Zudem kann die Standsicherheit realitätsnäher berechnet werden, was z. B. bei bestehenden übersteilen Böschungen an Kanälen das Entscheidungskriterium für die weitere Vorgehensweise (Erhalt, Beobachtungsmethode, Ertüchtigung, Neubau) ist. Des Weiteren finden die o. g. Parameter in der Planung eine bedeutsame Rolle, u. a. auch bei der Entscheidung welche Bauverfahren prinzipiell geeignet sind.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Die tatsächlichen physikalischen Eigenschaften von nichtbindigen norddeutschen Böden (Scherparameter und Kompressionsmodule) sollen durch systematische Untersuchungen und eigene Korrelationen mit Drucksondierungsergebnissen hergeleitet werden. Hierbei sind die unterschiedlichen Ablagerungsmilieus, wie z. B. marin, litoral, fluvial, glazial, besonders zu berücksichtigen.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Systematische Untersuchungen in einer Versuchsrube (in Anlehnung an Melzer, 1968) sowie Feldversuche mit ergänzenden Laboruntersuchungen sollen zum Einsatz kommen:

#### 1) Untersuchungen in einer Versuchsgrube:

Auf dem Gelände der Dienststelle Hamburg soll eine Versuchsgrube errichtet werden. In dieser Grube sind unter definierten Bedingungen verschiedene Korngemische einzubauen, um u. a. folgende Einflussparameter auf das Sondierergebnis zu untersuchen: Kornverteilung, Korngröße, Kornform, Kornrauigkeit, Verdichtung (Lagerungsdichte), Grundwasser, Chemismus (Salzgehalt, Kalkgehalt), Organik (Muschelreste, humose Bestandteile), Überlagerungsdrücke (Spannungsabhängigkeit), Alterung (Zementierung). Für das Einstellen eines beliebigen Grundwasserstands in der Versuchsgrube ist ein Wasserzu- und -ablaufsystem einzurichten. Des Weiteren ist die Versuchsgrube so zu planen, dass Messungen von Spannungen und Porenwasserdrücken im Boden möglich sind.

Mit dem BAW-eigenen Sondier-LKW werden die Sondierungen abgeteuft und die Sondierergebnisse (Spitzendruck, Mantelreibung, Reibungsverhältnis, Neigung, Porenwasserdrücke) aufgezeichnet. Hierbei können auch grundsätzliche Einflüsse auf das Sondierergebnis, wie verschieden ausgebildete CPT-Spitzen, deren Abnutzung, die Sondiergeschwindigkeit, etc. untersucht werden.

Zur Korrelation der Festigkeiten mit den Sondierergebnissen sind Laboruntersuchungen erforderlich. Ungestörte Proben sind vom eingebauten Material mittels Stechzylinder (Abgrabung) oder Gefrierverfahren zu gewinnen. Die Bodenprobe wird nachfolgend im Triaxial- sowie im Rahmenscher- und Kompressionsgerät eingebaut und die Scherfestigkeit und die Kompressionsmodule werden ermittelt.

Oberflächennah bzw. im Zuge einer schrittweisen Abgrabung sollen Plattendruckversuche durchgeführt werden und das Bodenersatzverfahren Anwendung finden, um mittels weiterer Verfahren auf den Kompressionsmodul und die Lagerungsdichte in situ schließen zu können und diese Ergebnisse mit den Laborversuchsergebnissen abzugleichen.

Des Weiteren sind vereinzelt ergänzende Untersuchungen mit der leichten (DPL) und schweren Rammsonde (DPH) sowie Bohrlochrammsondierungen (BDP) vorgesehen, um Korrelationen mit der CPT für die spezifischen Böden spannungsabhängig herzuleiten.

#### 2) Felduntersuchungen:

Im Rahmen von aktuellen Baugrunderkundungen bzw. an bereits erkundeten Lokationen sollen Spitzendrucksondierungen abgeteuft werden. Hierbei sollen ebenfalls Bohrkerne bzw. ungestörte Proben gewonnen werden, um diese nachfolgend in das Triaxialgerät und das Kompressionsgerät einzubauen. Im gewachsenen Boden ist aufgrund der natürlichen Heterogenität mit größeren Schwankungsbreiten der Ergebnisse zu rechnen, so dass diese Untersuchungen lediglich einen ergänzenden Charakter haben können.

### 3 Ergebnisse

In einer Literaturrecherche wurden Ergebnisse bisher durchgeführter Untersuchungen gesichtet. Des Weiteren wurde begonnen Unterlagen (Leistungsbeschreibung, Leistungsverzeichnis, Vergabevermerk) für eine öffentliche Vergabe der Planung der zu errichtenden Versuchsgrube zu erstellen.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016: Vergabe der Planungsleistung, Planung der Versuchsgrube  
2017: Errichtung der Versuchsgrube, erste systematische Untersuchungen in der Versuchsgrube  
2018: Weitere systematische Untersuchungen in der Versuchsgrube  
2019: Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2019.

## 5 Literatur

- DIN EN 1997-2 (2010): Eurocode 7. Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds; Deutsche Fassung EN 1997-2:2007 + AC:2010.
- DIN 4094-1 (2002): Baugrund – Felduntersuchungen – Teil 1: Drucksondierungen.
- Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M (1997): Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional, Routledge, London, New York.
- Melzer, K.-J. (1968): Sondenuntersuchungen in Sand, Mitteilungen aus dem Institut für Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik (VGB) der Technischen Hochschule Aachen, Heft 43.
- Melzer, K.-J., Bergdahl, U., Fecker, E. (2008): Grundbautaschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen, Abschnitt 1.2 Baugrunduntersuchungen im Feld, 7. Auflage, Ernst & Sohn.

## 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Auswirkung der Zugabe von Dotationswasser und Sonderbauwerken auf die Passierbarkeit von Fischaufstiegsanlagen**

**Netzplan-Nr.:** A39530170006

**Projektleiter/in:** Dr.-Ing. M. Henning, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Wasserstraße und Umwelt (W1)

**E-Mail:** martin.henning@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Funktionsfähigkeit von Fischaufstiegsanlagen hängt von der Auffindbarkeit und der Passierbarkeit ab. Neben den regulären Becken, für die bezüglich ihrer Anordnung und Dimensionierung bereits Bemessungsgrundlagen existieren, beinhalten fast alle Fischaufstiegsanlagen (FAA) an Bundeswasserstraßen (BWaStr). Sonderbauwerke, für die keine Bemessungsgrundlagen existieren und für die die Passierbarkeit sichergestellt werden muss.

Zur Verbesserung der Auffindbarkeit bei breiten Kraftwerkskanälen werden bspw. zusätzliche Einstiege angeordnet. Diese müssen durch Kanäle an die eigentliche FAA angeschlossen werden. Weiterer Untersuchungsbedarf ergibt sich bezüglich der Passierbarkeit der Becken, in denen mehrere Stränge der FAA, bspw. beim Anschluss verschiedener Einstiege, zusammengeführt werden. Dasselbe gilt auch für Becken, die oberhalb der Einstiege angeordnet sind und in die ein Vielfaches des Durchflusses der FAA als Dotationswasser zugegeben werden muss, um eine gute Leitströmung ins Unterwasser zu gewährleisten. Der Stand des Wissens (z. B. Dumont et al. 2005, DWA 2014) basiert im Wesentlichen auf Untersuchungen an Anlagen, die kleiner sind als jene an Bundeswasserstraßen oder andere Referenzfischarten betrachten (bei internationalen Veröffentlichungen).

Durch die an BWaStr häufig stark ausgeprägte Konkurrenzsituation mit einer Wasserkraftanlage sind laut Empfehlung von BAW/BfG (Weichert et al. 2013) mitunter erhebliche Wassermengen an verschiedenen Einstiegen notwendig, um die Auffindbarkeit zu gewährleisten. Dadurch ergeben sich spezielle Anforderungen an die FAA, die sich vor Allem in speziellen Einstiegsbecken bzw. Collection Galleries und großen Dotationsbecken äußern, in die Wasser zugegeben werden muss und die sich mitunter auf mehrere Stränge verzweigen. Die ingenieurwissenschaftliche Fragestellung umfasst die Gewährleistung der Passierbarkeit für diese weitgehend unerforschten Sonderbauwerke.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Im Zuge der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie und der Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes fällt die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit und insbesondere des Fischaufstieges in den gesetzlichen Auftrag der WSV. Im Hinblick auf die Dringlichkeit der Maßnahmen, der großen Zahl von ca. 250 durchgängig zu gestaltenden Stauanlagen und der zumeist beengten Platzverhältnisse an den Stauanlagen, besteht ein großes Bedürfnis nach neuen Erkenntnissen und daraus abgeleiteten Bemessungskriterien für Fischaufstiegsanlagen an Bundeswasserstraßen.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Durch das vorliegende FuE-Vorhaben sollen Sonderbauwerke standardisiert und daraus Bemessungsgrundlagen erarbeitet werden. Das betrifft die erforderliche Bauwerksgröße in Abhängigkeit der Durchflussmenge und die Ausgestaltung (Möblierung) der Becken und der Überleitungsbauwerke. Weiterhin müssen an der Schnittstelle zwischen Wasserzugabe und FAA, Parameter zur Dimensionierung von Rechen (vorrangig Austrittsgeschwindigkeit und Stababstand) so ermittelt werden, dass die Passierbarkeit gewährleistet ist, sich aber realisierbare Rechen- und somit Beckendimensionen ergeben.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Das FuE-Vorhaben ist in 3 Teilprojekte (TP) unterteilt:

- TP1: Dimensionierung von Einstiegs- und Verteilerbauwerken
- TP2: Dimensionierung von Dotations-, Beruhigungs- und Abschlagsbecken
- TP3: Dimensionierung von Überleitungsbauwerken (Kanälen), Collection Galleries und Ausstiegsbauwerken

Innerhalb der einzelnen Teilprojekte kommen neben gegenständlichen Modelluntersuchungen und hydronumerischen Modelluntersuchungen auch ethohydraulische Versuche zur Anwendung.

### 3 Ergebnisse

Um im Rahmen von TP1 erforderliches Wissen über die Abströmung und den Verlustbeiwerte von orthogonal angeströmten Horizontalrechen zu generieren, wurden in einer Masterarbeit Untersuchungen an einem gegenständlichen Modell durchgeführt (Weiler 2015). In der Arbeit wurden die Skalierungseffekte von Horizontalrechen beschrieben, wobei der Fokus der Untersuchung auf der Analyse lag, ob die Übertragbarkeit von einem Rechen im Maßstab 1:5 im Sinne der Modellgesetzte gegeben ist. Des Weiteren wurden Verlustbeiwerte für Modellrechen ermittelt. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse wurde für gegenständliche Modellversuche die Verwendung eines 1:1-Rechenmaßstabs empfohlen, da bei verkleinerten Rechen geringe Reynoldszahlen keine Modellähnlichkeit ermöglichen.

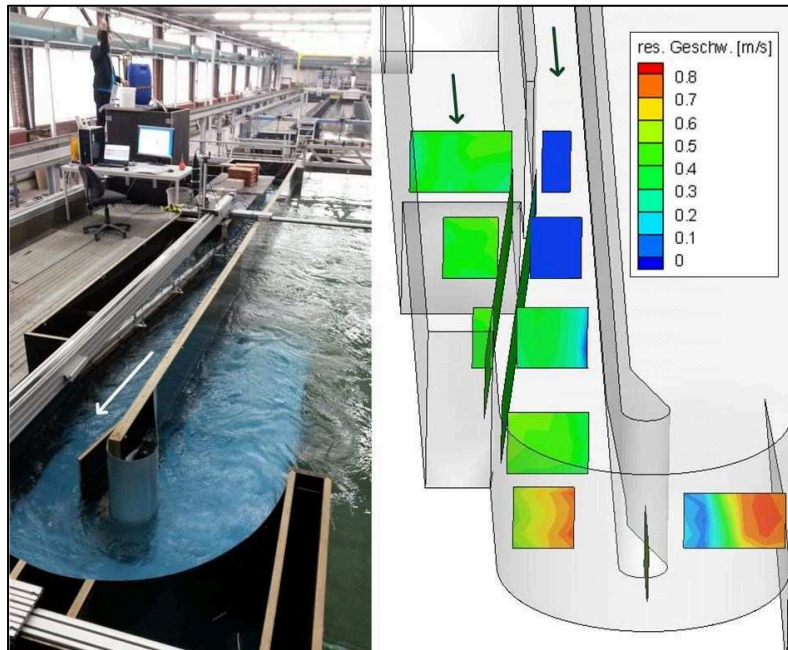
Neben der Masterarbeit wurde in TP1 begonnen, die Anwendung von porösen Medien als Rechenersatz in hydronumerischen (HN) Modellen mit OpenFOAM zu implementieren, zu testen und zu kalibrieren. Dabei konnte bisher die Poröse-Medien-Gleichung im Fall eines orthogonal angeströmten Rechens erfolgreich für die vereinfachte numerische Abbildung des Rechenverlustes und der Rechenabströmzone eingesetzt werden. In den nächsten Schritten werden die gewonnenen Erkenntnisse über orthogonal angeströmte auf schräg-angeströmte Horizontalrechen übertragen.

Um Dotationsbecken grundlegend zu untersuchen wurde ein gegenständliches Modell aufgebaut und in Betrieb genommen (TP1, TP2) (Bild 1 links). Das Modell bildet das Einstiegsbecken einer FAA mit Dotation über einen spitzwinklig angeordneten Horizontalrechen ab. Um grundlegende Erkenntnisse über die vorherrschende Strömung in einem Einstiegsbecken zu gewinnen, in dem zu dem Betriebswasser der FAA eine große Menge Wasser über einen Horizontalrechen zugegeben wird, wurde der geplante Zustand mittels ADV-Messungen aufgenommen (Bild 1 rechts). Erste Ergebnisse zeigten zwar, dass ein spitzwinklig angeordneter Rechen Vorteile für eine homogene Rechenbeaufschlagung hat, jedoch Optimierungsschritte notwendig sind. In einem Folgeversuch konnte gezeigt werden, dass eine homogene Rechenbeaufschlagung auftritt, wenn das Dotationswasser oberhalb des Rechens beruhigt wird. In den daran anschließenden Versuchen werden zurzeit Möglichkeiten untersucht, die Beruhigung des Dotationswassers unter Bedingungen im Rahmen der konstruktiven Möglichkeiten an zu bauenden FAA zu realisieren. Dabei spielen insbesondere die Art des Anschlusses der Dotationsleitung sowie Gleichrichtungselemente eine Rolle. Die oben beschriebenen Erkenntnisse über den hydraulischen Anschluss der Dotationsleitung, die Beruhigung des Dotationswassers und die Anordnung des Dotationsbeckens fließen aktuell in den Planungsprozess der Pilotanlagen Wallstadt und Eddersheim (Main/WNA Aschaffenburg) ein. Zudem werden die Ergebnisse für den Aufbau eines ethohydraulischen Modells benötigt. Die bei den beschriebenen Versuchen aufgenommenen ADV-Daten dienen außerdem dem Aufbau und der Kalibrierung eines HN-Modells, sodass nach Beendigung der gegenständlichen Modellversuche eine Planungsunterstützung an den Pilotanlagen fortlaufend numerisch erfolgen kann.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wird momentan die Ausbildung des Wanderkorridors für Fische in einem Einstiegsbecken mit Dotation in einem separaten gegenständlichen Modell unter hydraulischen Gesichtspunkten untersucht. Der Schwerpunkt der hierfür durchgeführten Variantenstudie liegt darauf, unterschiedliche geometrische Varianten im Bereich des Anschlusses der FAA an das Dotationsbecken aufzunehmen und zu vergleichen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen fließen ebenfalls in den Aufbau und die Variantenstudie des ethohydraulischen Modells ein.

Ebenfalls in einem gegenständlichen Modell wurde das Wasserspiegellagengefälle von Überleitungskanälen untersucht (TP3). Hierfür wurden für verschiedene Durchfluss-Szenarien und Rauheiten Wasserspiegellagen-Messungen durchgeführt. Zusätzlich wurden ADV-Messungen durchgeführt um die Ausbreitung von Schlitzströmungen im Überleitungskanal zu untersuchen.

Im Rahmen von TP1 und TP2 wurde mit der BfG ein Konzept für ethohydraulische Versuche erarbeitet. Zur Vorbereitung dieser Versuche wurde eine Rinne in Halle V mit einem Pumpensystem ausgestattet (Inbetriebnahme Januar 2016).



*Bild 1: links: Das gegenständliche Modell von einem Einstiegsbecken mit Dotation; rechts: durch ADV-Messungen ermittelter Ist-Zustand im Dotationsbecken (Modellmaßstab).*

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016

- Fortführen der Untersuchungen über die Abströmzone von schräg angeströmten Horizontalrechen und Weiterentwicklung der OpenFOAM-Anwendung (TP1)
- Untersuchung des Anschlusses der Dotationsleitung für weitere Planungsfälle (TP2)
- Aufbau und Betrieb von HN-Modellen zur Optimierung von Einstiegsbecken (TP1)
- Fertigstellung des Umbaus der Versuchsrinne in Halle V der BAW für ethohydraulische Versuche
- Durchführung der ethohydraulischen Versuche zur Ermittlung der Bemessungsgeschwindigkeit am Rechen und zur Passierbarkeit des Einstiegsbeckens

2017/2018

- Weiterführung ethohydraulische Versuche; Zugabeart Dotationswasser (TP1)
- Untersuchungen zur Dimensionierung von Verteil-, Beruhigungs- und Abschlagsbecken (TP2)
- Untersuchung der Dimensionierung von Überleitungsbauwerken und Collection Galleries (TP3)

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2018.

#### 5 Literatur

- Dumont, U., P. Anderer & U. Schwevers (2005): Handbuch Querbauwerke. Düsseldorf (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und ländlichen Raum NRW), 212 S.
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2010): Merkblatt DWA-M 509 Fischaufstiegsanlagen und Fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. – Gelbdruck Februar 2010, 285 S
- Weichert, R., Kampke, W., Deutsch, L., Scholten, M. (2013): Zur Frage der Dotationswassermenge von Fischaufstiegsanlagen an großen Fließgewässern, Wiesbaden, Vieweg-Verlag, 1/2 2013, s. 33ff

## **6 Veröffentlichungen**

Weiler, D. (2015): Physikalische Untersuchungen eines Horizontalrechens für die Zugabe von Dotationswasser in Fischaufstiegsanlagen, Master-Thesis HS Karlsruhe/BAW



## **Modellierung aufwärtsgerichteter Fischwanderung auf Basis der „Eulerian-Lagrangian-agent method“**

**Netzplan-Nr.:** A39530170007

**Projektleiter/in:** Dipl.-Ing. D. Gisen, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat Wasserstraße und Umwelt (W1)

**E-Mail:** david.gisen@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Auffindbarkeit ist für die Funktionsfähigkeit von Fischaufstiegsanlagen (FAA) ein entscheidender Faktor. Existierende Richtlinien wie das DWA-Merkblatt 509 (DWA, 2014) und weitere wissenschaftliche Erkenntnisse sind jedoch oft nicht detailliert genug, um Planungsfragen zur Auffindbarkeit quantitativ zu beantworten. Rein hydraulische Modelluntersuchungen können Antworten liefern, stoßen jedoch bei geringfügigen Planungsunterschieden mangels geeigneter biologischer Bewertungsmethoden an ihre Grenzen.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die WSV plant momentan an 57 Standorten den Bau einer FAA (Stand Januar 2016), bis 2027 sind insgesamt ca. 250 Anlagen zu errichten. Fragen nach der optimalen Position, baulichen Gestaltung und Anzahl der Einstiege in eine FAA und dem Leitabfluss sind überall kostenrelevant, insbesondere bei paralleler Wasserkraftnutzung.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel des FuE-Projekts ist die Entwicklung eines numerischen Verfahrens, welches den quantitativen Vergleich von FAA-Varianten in Bezug auf die Auffindbarkeit möglich macht. Basis dieses Verfahrens ist die Kopplung hydrodynamisch-numerischer (HN-)Modelle mit der ELAM („Eulerian-Lagrangian-agent method“). Die Arbeitsbezeichnung der Implementierung der ELAM für die Bundeswasserstraßen lautet „ELAM-de“.

### **2 Untersuchungsmethoden**

Zur Simulation der relevanten Bereiche in Kraftwerksunterwassern setzt die BAW momentan 3D-HN-Modelle in OpenFOAM® ein (Heinzelmann und Gisen, 2013). Zur 2D-Simulation von Stauhaltungen wird Telemac-2D verwendet. Es ist ein Teilziel dieses Projekts, die Genauigkeit und den Gültigkeitsbereich der Modelle für auffindbarkeitsbezogene Anwendungen weiter zu verbessern.

Die ELAM wird seit ca. 15 Jahren vom renommierten US Army Corps of Engineers zur Beschreibung der abwärtsgerichteten Wanderung von Jungsalmontiden entwickelt und angewandt. Bestehende ELAM-Modelle verwenden hydraulische Parameter aus 2D- und 3D-HN-Modellen sowie kalibrierte Grenzwerte, um das Schwimmverhalten von Fischen nachzubilden (Goodwin et al., 2014). Der Quellcode (Fortran 90) liegt BAW/BfG vor, ist in der alten Version (ELAM-2014) jedoch nicht mit unstrukturierten Gittern, wie von aktuellen Verfahren wie OpenFOAM und Telemac-2D verwendet, kompatibel. Die Kompatibilität zu OpenFOAM soll innerhalb dieses Projekts hergestellt werden.

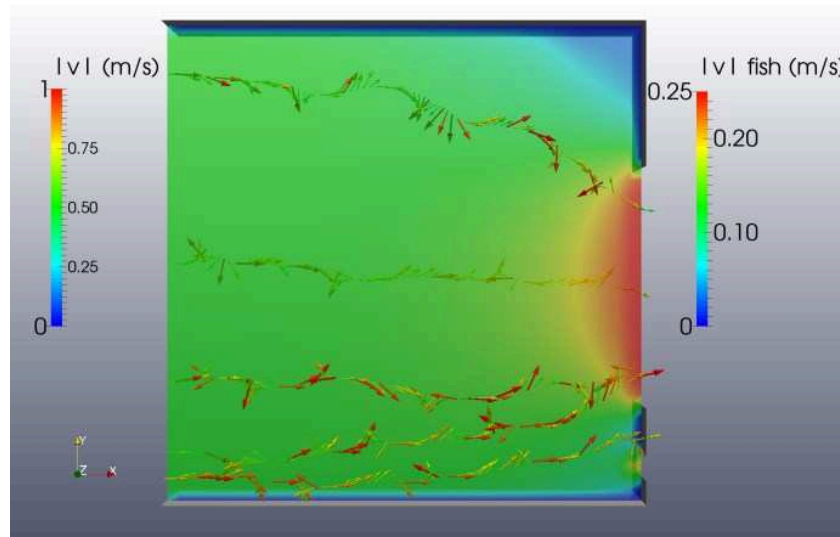
Ein Verhaltensmodell für die aufwärtsgerichtete Wanderung einer einheimischen Spezies soll durch Analyse des bestehenden Verhaltensmodells für die abwärtsgerichtete Wanderung, Literaturrecherche und Auswertung von Verhaltensbeobachtungen in Kooperation mit der BfG entwickelt werden.

Felddaten über das Verhalten von aufwandernden einheimischen Fischarten werden durch die BfG mittels Telemetrie in der Stauhaltung Kostheim/Main und an der FAA Koblenz/Mosel gewonnen. Labordaten über 3D-Fisch-Bewegungen soll ab Frühjahr 2016 die neue ethohydraulische Rinne an der BAW liefern. Die Daten sollen als Input für mehrere ELAM-de-Modelle verwendet werden.

### 3 Ergebnisse

Bis Ende März 2015 konnte der alte Fortran-Code (ELAM-2014) an der BAW kompiliert und auf einen speziellen Testfall (strukturiertes Gitter, Fischabstieg) angewandt werden (

*Bild* ).



*Bild 1: Vektoren der Fischeorientierung und –geschwindigkeit (m/s) in der Draufsicht auf einen speziellen Testfall für den Fischabstieg, Fließrichtung von links nach rechts. Fließgeschwindigkeit (m/s) flächig dargestellt.*

Im März/April wurden durch die BfG Fischbesonderungen in der Stauhaltung Kostheim und im Unterwasser und Verlauf der FAA Koblenz durchgeführt. Nach Auswertung werden die Ergebnisse der BAW voraussichtlich 2016 zur Verfügung gestellt.

Im April wurde das ufernahe Saugrohr der Wasserkraftanlage Eddersheim mit einem 3D-Scanner zentimetergenau vermessen, um die Genauigkeit der Geometrie im 3D-HN-Modell zu verbessern.

Vom 16. bis 22. Mai besuchte A. Goodwin die BAW für einen intensiven fachlichen Austausch bezüglich seines Codes. Die angestrebte Kooperation konnte wegen inhaltlicher Bedenken seitens der amerikanischen Verwaltung nicht vertraglich fixiert werden. Goodwin ist jedoch bereit, per E-Mail Fragen zu beantworten, soweit es seine Zeit erlaubt.

Am 15. Juli wurde das Thema des FuE-Projekts als Dissertationsthema in die Promotionsliste der Universität der Bundeswehr München aufgenommen. Dadurch ist ein externer fachlicher Austausch mit Prof. Dr.-Ing. A. Malcherek gewährleistet.

Die teilweise Nachbildung und Kopplung des alten Codes mit einem neuen, C++-basierten Steuercode unter Ausnutzung bestehender Funktionen der OpenFOAM-Toolbox (ELAM-de) wurde im Herbst 2015 so weit umgesetzt, dass sich passive und aktive (Fische) Partikel durch ein stationäres Strömungsfeld bewegen. Die Verhaltensdatei aus ELAM-2014, behaviorRule.f90, ist zum Jahresende 2015 vollständig angebunden und kompatibel mit dem neuen Code ELAM-de.

### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016:

- Integration folgender Funktionen von ELAM-2014 in ELAM-de: Fähigkeit der Fische mit Wänden zu kollidieren und das Modellgebiet zu verlassen, Ergebnisausgabe
- Neuentwicklung: Interaktion von Fischen mit der freien Wasseroberfläche (in ELAM-2014 nicht vorhanden)

Validierung von ELAM-de gegenüber ELAM-2015 mittels des speziellen Testfalls für den Abstieg (s.o.,

- *Bild* )
- Ab dem 2. Quartal: Entwicklung und Implementierung eines Verhaltensmodells für die Aufstiegs-  
wanderung für zunächst eine Spezies auf Basis des bestehenden Abstiegsmodells, von Literatur-  
recherche und Naturbeobachtungen. Dies soll in enger Abstimmung mit der BfG und einem/einer  
auf Fischverhalten spezialisierten Lehrstuhlinhaber/-in erfolgen.
- Ab dem 3. Quartal: Das Verhaltensmodell und die Software sollen sukzessive in mehreren, kom-  
plexer werdenden Fallstudien erprobt und die nötigen Parameter kalibriert werden. In Frage  
kommen dabei die ethohydraulische Rinne der BAW, der Standort Ruswarp (UK) und der Stand-  
ort Eddersheim (Main). Für Eddersheim besteht bereits ein 3D-HN-Modell, das jedoch für weitere  
Abflusszustände kalibriert werden muss. In die Modellierung des Kraftwerksunterwassers können  
Ergebnisse einer FuE-Kooperation mit der TU München (FuE-Nr. B3953.01.04.70004) einfließen.

2017:

- Weiterhin Modellierung der o.g. Fallstudien
- Weiterentwicklung des Verhaltensmodells
- Vervollständigung der Dokumentation

2018:

- Betrieb der Modelle der o.g. Fallstudien z. B. für weitere Randbedingungen
- Kalibrierung des Verhaltensmodells für weitere Spezies und Standorte
- Weiterentwicklung von ELAM-de für instationäre Strömungsfelder

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2018.

## 5 Literatur

DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) (2014): Merkblatt DWA-M  
509. Eigenverlag, Hennef.

Goodwin, R.A., Politano, M., Garvin, J.W., Nestler, J.M., Hay, D., Anderson, J.J., Weber, L.J., Dimperio,  
E., Smith, D.L., Timko, M. (2014): „Fish navigation of large dams emerges from their modulation of  
flow field experience“. Proceedings of the National Academy of Sciences, Band 111, Heft 14, S. 5277–  
5282.

Heinzelmann, Ch., Gisen, D. (2013): Hydraulische Untersuchungen zur Auffindbarkeit von Fischauf-  
stiegsanlagen an Bundeswasserstraßen. Fachtagung Ökohydraulik. Hrsg.: TU München, Institut für  
Wasser und Umwelt. S. 37-48, ISBN: 978-3-943683-04-2.

## 6 Veröffentlichungen

-/-

## **EU-Vorhaben Prominent / Horizon 2020**

**Netzplan-Nr.:** A39530470007

**Projektleiter:** A. Orlovius, Abt. Wasserbau im Binnenbereich, Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4)

**E-Mail:** andreas.orlovius@baw.de

## **1 Problemstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die EU plant ab 2020 die Verschärfung der Grenzwerte für den Schadstoffausstoß von Binnenschiffen. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen des Call H2020-MG-2014\_TwoStages ein von der EU gefördertes FuE-Vorhaben ausgeschrieben. Im August 2014 beteiligte sich die BAW zusammen mit der DST (Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.) in Duisburg und vielen anderen Projektpartnern an der Ausschreibung. Das Vorhaben wurde genehmigt und im Mai 2015 beauftragt.

Das Ziel des PROMINENT (Promoting innovation in the inland waterways transport sector)-Vorhabens ist es, ein Assistenz- bzw. Onboard-System für die Binnenschifffahrt zu entwickeln und zu erproben, mit dem ein Binnenschiff aktuelle Informationen und Empfehlungen zum Fahrwasser und zu den Propulsionsdaten erhält. Durch eine angepasste Fahrweise sollen auf diese Weise der Treibstoffbedarf und damit die klimaschädlichen Emissionen verringert werden.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Treibstoffeinsparungen stärken die Wettbewerbsfähigkeit und ein verminderter Schadstoffausstoß fördert das Image der Binnenschifffahrt und der WSV. Außerdem führt eine gleichmäßigere Fahrweise, wie sie durch das zu entwickelnde Assistenz-System erreicht werden soll, dazu, dass seltener mit hohen Schiffsgeschwindigkeiten gefahren wird. Demzufolge ist mit geringeren Uferbelastungen zu rechnen, was den Unterhaltungsaufwand für die WSV mindert.

### **1.3 Untersuchungsziele**

Eine optimale Befahrung von Binnengewässern zur Minimierung des Treibstoffbedarfs bei gleichzeitiger pünktlicher Ankunft kann nur gelingen, wenn aktuelle Informationen über die Strömungs- und Tiefenverhältnisse zur Verfügung stehen.

In dem FuE-Vorhaben PROMINENT soll ein Assistenz- bzw. Onboard-System, das einem Schiffsführer Hinweise geben soll, wie er unter Wahrung der Termintreue spritsparend fahren kann, entwickelt werden. An der Entwicklung beteiligt sind in dem Teilprojekt SWP 5.4 neben der BAW das DST in Duisburg und die TNO (Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek; Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung).

Die BAW hat die Aufgabe, drei Binnenschiffe mit Sensortechnik zur Erfassung von Position, Tiefe und Strömung auszurüsten, Messdaten im Schiffsbetrieb zu erheben und an den Leadpartner TNO zu übermitteln. Ziel der BAW-Untersuchungen ist die Entwicklung und Überprüfung möglichst effizienter Methoden zur Erhebung, Übertragung und Validierung schiffsbezogen erhobener Tiefen- und Strömungsdaten.

TNO erstellt auf Basis dieser Messdaten sowie auf Basis von 1D- und 2D-Modelldaten, die ebenfalls von der BAW für die Teststrecke am Mittelrhein zur Verfügung gestellt werden, eine fortlaufend aktualisierte Strömungs- und Tiefendatenbank sowie das Onboard-System.

Das DST macht Modellversuche für die drei Versuchsschiffe, um Beziehungen zwischen Schiffswiderstand und Propulsionsgütegrad zu ermitteln, auf deren Basis TNO das Onboard-System entwickeln und kalibrieren wird.

## 2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Vorhabens werden von der BAW drei Binnenschiffe (ein Fahrgastschiff, zwei Frachtschiffe) mit Sensorik zur Erfassung von Position, Tiefe und Strömungsgeschwindigkeit ausgerüstet. Hierbei werden unterschiedliche Messgeräte und -methoden eingesetzt und die Ergebnisse mit den entsprechenden Informationen aus einem 2D-Modell und aus anderen verfügbaren Datenquellen verglichen sowie der Aufwand für Installation und Betrieb bewertet.

## 3 Ergebnisse

Das Fahrgastschiff MS Symphonie der Reederei CroisiEurope wurde Mitte 2015 mit Messgeräten zur Erfassung von Position und Strömung ausgerüstet und erhebt seit dieser Zeit Daten im Testbetrieb.

Installiert wurde am Bug des Fahrgastschiffes ein Horizontal-ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) zur Messung der Fließgeschwindigkeiten vor dem Schiff. Diese Anordnung wurde gewählt, um weitgehend ungestörte Strömungsgeschwindigkeiten zu erfassen, die außerhalb des durch das Schiff selbst beeinflussten Bereiches liegen. Erste Ergebnisse zeigen, dass eine Strömungsmessung mit dem hier eingesetzten Messgerät bis etwa 20 m vor dem Bug möglich ist. Zur Ermittlung von Sohlenhöhen im Schiffspfad wird derzeit das bordeigene Echolot verwendet. Die Georeferenzierung der Daten erfolgt mit Hilfe einer dGPS-Anlage (bestehend aus zwei Empfängern) unter Verwendung eines Echtzeit-Korrekturdatendienstes. Die Position aller Sensoren bezogen auf das Schiffskordinatensystem wurde auf der Werft vermessen. Alle Messdaten werden derzeit an Bord zusammengeführt, abgespeichert und bedarfsweise übertragen.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

### Phase 2:

10/2015 - 06/2016

- Instrumentierung der Versuchsschiffe
- Testphase, Erprobung der Sensortechnik
- Erprobung der Datenübertragung
- Übermittlung von Strömungsdaten für den Mittelrhein an TNO

### Phase 3:

07/2016 - 03/2017

- Sammeln, Auswerten und Übermitteln von Daten mit drei Versuchsschiffen
- Bewertung der erreichbaren Genauigkeit von Peil- und Strömungsdaten
- Bewertung des Aufwandes für Installation und Betrieb

### Phase 4:

04/2017 - 07/2017

- Erstellung der Abschlussberichte

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2017.

## 5 Literatur

-/-

## 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Entwicklung eines impliziten numerischen Verfahrens zur Langfristsimulation der Hydro- und Morphodynamik in Fließgewässern**

**Netzplan-Nr.:** A39530570004

**Projektleiter:** Dr.-Ing. L. Stadler, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

**E-Mail:** leopold.stadler@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die zuverlässige Langfristsimulation der Hydro- und Morphodynamik in Flüssen setzt neben einem robusten und zuverlässigen numerischen Verfahren den Umgang mit den Modellunsicherheiten voraus. Modellunsicherheiten haben unterschiedliche Ursachen, ein klassisches Beispiel sind fehlerhafte oder ungenügende Eingangsdaten zur Beschreibung des Anfangszustandes. In der Praxis muss zum Beispiel die räumliche Sedimentverteilung aus wenigen punktuellen Messungen geschätzt werden. Eine wesentliche Unsicherheit bei der Langfristsimulation liegt in den hydraulischen Randbedingungen (Zuflussganglinien), die für die Simulation der zukünftigen Sohlentwicklung angesetzt werden. Selbst bei einer perfekten Beschreibung des Anfangszustands hängt der Endzustand entscheidend von der verwendeten Zuflussganglinie ab. Für belastbare Aussagen über die langfristige Sohlentwicklung reicht es deswegen nicht aus, eine einzelne Simulation mit einer Ganglinie durchzuführen. Belastbare Prognosen sind nur möglich, wenn die Variabilität der hydraulischen Randbedingungen berücksichtigt wird. Diese Variabilität kann durch Ensemble-Rechnungen abgebildet werden, auf deren Grundlage die Prognoseunsicherheit abgeschätzt werden kann.

Der Abfluss und somit auch die Strömung sind in Flüssen häufig über Stunden hinweg nahezu konstant. Die derzeit eingesetzten Verfahren müssen eine zeitliche Auflösung (Zeitschrittweite) von wenigen Sekunden verwenden. Durch eine voll implizite Zeitdiskretisierung kann die Gesamtrechnenzeit verkürzt werden, da die Zeitschrittgröße weniger stark durch numerische Stabilitätskriterien (CFL-Bedingung) begrenzt ist (siehe Bilancieri et al. 2010). Ziel des FuE-Projektes ist es, ein voll implizites numerisches Verfahren zu entwickeln, mit dem die langfristige und großräumige Sohlentwicklung in Fließgewässern simuliert werden kann. Das neue Verfahren soll bei angemessener Genauigkeit deutlich größere Zeitschritte als bisherige Verfahren erlauben.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Fragestellungen der WSV, die eine langfristige und großräumige Prognose der Entwicklung der Gewässersohle erfordern, könnten in Zukunft mit Hilfe impliziter numerischer Verfahren beantwortet werden. Durch die verkürzten Rechenzeiten lassen sich längere Zeiträume modellieren und Unsicherheiten, wie sie etwa in den Anfangs- und Randbedingungen vorliegen, mit Hilfe statistischer Methoden untersuchen. Mit der Möglichkeit Ensemble-Rechnungen durchzuführen, kann die Belastbarkeit der Modellaussagen erheblich gesteigert werden.

#### **1.3 Untersuchungsziel**

Ziel der Untersuchung ist es, den Grundstein für ein voll gekoppeltes, voll implizites Verfahren zur Lösung der Flachwassergleichungen und des Feststofftransports zu legen, mit dem die langfristige und großräumige Sohlentwicklung zweidimensional simuliert werden kann. Dazu muss zunächst geklärt werden, ob die voll implizite Diskretisierung zu einer Steigerung der numerischen Effizienz führt und ob bei den erforderlichen großen Zeitschrittweiten die Ergebnisse dennoch vergleichbar mit den Ergebnissen einer expliziten Zeitdiskretisierung bleiben. Mit dem effizienten impliziten Verfahren sollen Ensemble-Rechnungen durchgeführt werden, wobei die relevanten Parameter wie etwa der Sedimentdurchfluss oder die Sohlentwicklung zur Laufzeit analysiert und ausgegeben werden sollen.

## 2 Untersuchungsmethoden

Für das Vorhaben ist ein Vergleich der Ergebnisse in der Hydrodynamik zwischen einer voll impliziten und expliziten Zeitdiskretisierung und den aktuell in der Abteilung W eingesetzten Verfahren durchzuführen. Dadurch kann die Effizienz und Qualität des entwickelten impliziten Verfahrens bewertet werden. Der Vergleich soll anhand einer Reihe von Standardtestfällen durchgeführt werden. Zusätzlich soll eine Validierung an einem Teilabschnitt des Projekts „Gesindezugabe mittlerer Niederrhein“ (GSZ-MN) erfolgen. Dabei soll unter anderem geklärt werden, wie groß die Zeitschrittweiten für das implizite Verfahren für typische Fragestellungen an Bundeswasserstraßen gewählt werden können. Im letzten Schritt soll die Wirksamkeit von Ensemble-Rechnungen für die Prognose und Sensitivitätsanalyse untersucht werden.

## 3 Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde ein erster Prototyp eines voll impliziten Modells zur Lösung der 2D Flachwassergleichungen inklusive eines einfachen Feststofftransportmodells (Einkorn) entwickelt und erste Untersuchungen durchgeführt.

Es hat sich gezeigt, dass die Zeitschrittgröße vor allem bei nahezu stationären Zuständen (Hydrodynamik) weit größer als bei expliziten Verfahren gewählt werden kann. Bei stark instationären Prozessen, wie der Überflutung bei einem Hochwasserereignis, wird die mögliche Zeitschrittweite jedoch durch die abzubildenden physikalischen Prozesse limitiert. Hier hat das implizite Verfahren keine nennenswerten Vorteile, was die Wahl der Zeitschrittweite angeht. Ein Vorteil des impliziten Verfahrens ist jedoch, dass die volle Kopplung zwischen Hydrodynamik und Morphodynamik bei der Wahl entsprechender numerischer Flussfunktionen (numerical flux) zu einem äußerst stabilen Verfahren führen kann (vgl. Cordier et al. 2011).

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2015-2016:

- Umsetzung des bisherigen Prototypen (Hydrodynamik) in der Entwicklungsumgebung DUNE
- Vergleich zwischen voll implizitem und explizitem Ansatz (Hydrodynamik)
- Validierung der Hydrodynamik an Testfällen (BAW Testfälle)
- Umsetzung der vorhandenen Morphodynamik in DUNE

2017-2018:

- Veröffentlichung der Arbeiten
- Entwicklung und Implementierung eines Konzepts für den Geschiebetransport (Mehrkorn)
- Validierung von Hydrodynamik und Geschiebetransport an Testfällen aus dem Alltag
- Untersuchung der Unsicherheiten bei der Langzeitsimulation anhand eines Praxisbeispiels

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2018.

## 5 Literatur

Bilanceri M.; F. Beux; I. Elmahi; H. Guillard; M.V. Salvetti (2010): Linearised implicit time-advancing applied to sediment transport simulations. INRIA Research Report, RR-7492.

Cordier S.; M.H. Le; T. Morales de Luna (2011): Bedload transport in shallow water model: why splitting (may) fail, how hyperbolicity (can) help. Advances in Water Resources, Vol. 34 (8), S. 980-989.

## 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Maßstabseffekte (MSE)**

**Netzplan-Nr.:** A39550270174

**Projektleiter:** Dr.-Ing. C.-U. Böttner, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

**E-Mail:** carl-uwe.boettner@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Übertragung von experimentell ermittelten Messwerten aus dem Modellmaßstab in den Naturmaßstab ist mit Unsicherheiten behaftet. Dies resultiert wesentlich aus der Anforderung, dass die Ähnlichkeitsgesetze für alle Aspekte einer Strömung zugleich erfüllt sein müssten. Prominentes Beispiel im Schiffbau dafür, dass dies nicht möglich ist, ist die gleichzeitige Erfüllung der Reynoldsschen und der Froudeschen Ähnlichkeit. Als Lösungsansatz werden für viele regelmäßig zu bearbeitende Aufgaben im schiffbaulichen Versuchswesen empirische Korrekturansätze genutzt, zum Beispiel die Reibungskennlinie beim Propulsionsversuch. Für die meisten Experimente wird davon ausgegangen, dass der Fehler durch Maßstabseffekte max. in der Größenordnung des Messfehlers liegt. Dies ist eine praktikable, aber nicht abgesicherte Annahme und Vorgehensweise. Ziel dieser Untersuchung ist daher eine fundierte Angabe des Gültigkeitsbereichs und der Fehlerabschätzung bei Fragen der Fahrdynamik. Die Fragestellung besteht aus der Bestimmung der Größenordnung der Maßstabseffekte, die zu berücksichtigen sind, wenn Messwerte aus dem Modellversuchswesen auf den Naturmaßstab übertragen werden müssen. Die Schwierigkeit liegt hierbei in einem Zusammenspiel unterschiedlicher Effekte, die einzeln nur grob bekannt sind und im Gesamteffekt schwer abzuschätzen sind. Das schiffbauliche Versuchswesen und die Schiffbauforschung beschäftigen sich nur teilweise mit diesem Phänomen, wenn es um die Übertragung des Widerstands für die Propulsionsbemessung geht. Trotz intensiver Forschung in den vergangenen hundert Jahren, konnte bislang kein universeller Ansatz einer Übertragungsfunktion gefunden werden. Stand der Technik ist hier, dass jede schiffbauliche Versuchsanstalt einen individuellen Ansatz hat diese Übertragung vorzunehmen, der zumeist irgendwann an einem oder mehreren Präzedenzfällen abgeglichen und validiert wurde. Werden mehrere Kräfte betrachtet, wird der Gültigkeitsbereich einer solchen Abschätzung meist verlassen. Viele Kräfte und Effekte, die für die WSV relevant sind, wurden bislang schiffbaulich gar nicht oder nur in sehr geringem Umfang untersucht.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Absicherung der Genauigkeits- und Gültigkeitsbereiche der Modellversuche bei Übertragung auf den Naturmaßstab (Großausführung) ist bei vielen Aufgaben der WSV nötig. Eine Verfeinerung der bisherigen Abschätzungen bei der Übertragung führt zu präziseren und verlässlicheren Aussagen zur Wechselwirkung Schiff- Schifffahrtsstraße. Zusätzlich kommen die Erkenntnisse aus diesem Projekt der Schiffs-führungssimulation bei Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse sowohl im See- als auch im Binnenbereich zugute, da sie die Einsatzmöglichkeit von Modellversuchen für die Kalibrierung von Koeffizienten der Simulation signifikant verbessern. Hierdurch steht das „Expert Rating“ nicht mehr als einziges Validierungskriterium zur Verfügung, sondern kann durch weitere, objektive Kriterien ergänzt werden.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel in diesem Projekt ist es, die auftretenden Maßstabseffekte bei der Übertragung von Modellversuchen auf den Naturmaßstab bei Fragen der Fahrdynamik und auftretenden Kräften auf das Schiff getrennt zu ermitteln. Hierdurch wird eine fundierte Angabe des Gültigkeitsbereichs und der Fehlerabschätzung ermöglicht.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Der Übertragungsfehler bei Auswertung von Modellversuchen soll im direkten Vergleich mit Naturmessungen ermittelt werden. Für Kräfte und weitere fahrdynamische Größen, die in der Naturmessung nicht zugänglich sind, sollen numerische Simulationen im Naturmaßstab erstellt werden. Die Modellversuche und die numerischen Modellrechnungen werden in einer Serie verschiedener Maßstäbe durchgeführt, um eine systematische Analyse der Übertragungseffekte zu ermöglichen. Im Bereich der Binnenschifffahrt



erfolgt der Vergleich von Manöverfahrten (wie z. B. Z-Manöver) aus Naturuntersuchungen mit einem 135 m langen Binnenschiff und Modelluntersuchungen mit dem verfügbaren Referenzschiff im Modellmaßstab von 1:16 eines in der Natur 135 m langen Binnenschiffes aus dem FuE-Projekt A39530470003.

### 3 Ergebnisse

Bereich Seeschifffahrt:

Im Berichtszeitraum wurde ein Versuchsträger ausgewählt und die notwendigen Daten hierzu beschafft. Weiter wurden Auftragnehmer ausgewählt und Vergaben geplant.

Die Randbedingungen für die Auswahl eines Versuchsträgers sind weit gefächert. Folgende Kriterien sind zu erfüllen:

- Ausreichende Hauptabmessungen für eine Serie verschiedener Maßstäbe
- Konventionelles Antriebssystem, das im Modellversuch nachgebildet werden kann
- Verfügbarkeit der Linien, damit Modelle gebaut und numerische Strömungsberechnungen durchgeführt werden können
- Verfügbarkeit des Schiffes für Manöverversuche in der Großausführung, im besten Fall flexibel, um günstige Wettersituationen nutzen zu können
- Glatter und guter Zustand des Unterwasserschiffs, um fehleranfällige Korrekturen für Bewuchs und Rauigkeit zu vermeiden

Es wurde ein geeignetes Schiff gefunden und verfügbare Unterlagen dafür zusammengetragen. Das Schiff ist das Gewässerschutzschiff „MELLUM“ (Bild 1), das die Kriterien erfüllt. Die Länge des Schiffes beträgt 80 m und ist damit noch ausreichend für eine Serie von Modellen im Maßstab 1:10, 1:20 und 1:30. Die Modelllängen werden damit 8 m, 4 m und 2,67 m betragen. Die Mellum verfügt über zwei Antriebe, die jeweils aus einem Propeller in Kort-Düse und einem Ruderblatt besteht (Bild 2). Die Mellum geht im Frühjahr 2016 in die Werft und steht im Sommer 2016 mit frisch gemachtem Unterwasserschiff für Versuche zur Verfügung. Es ist vorgesehen die Manöverversuche im regulären Einsatz des Gewässerschutzschiffs ohne große Störung einzuschieben.



Bild 1: Aufnahme der Mellum in Fahrt (WSA-Whv) und Darstellung der digitalen Rumpfgeometrie.

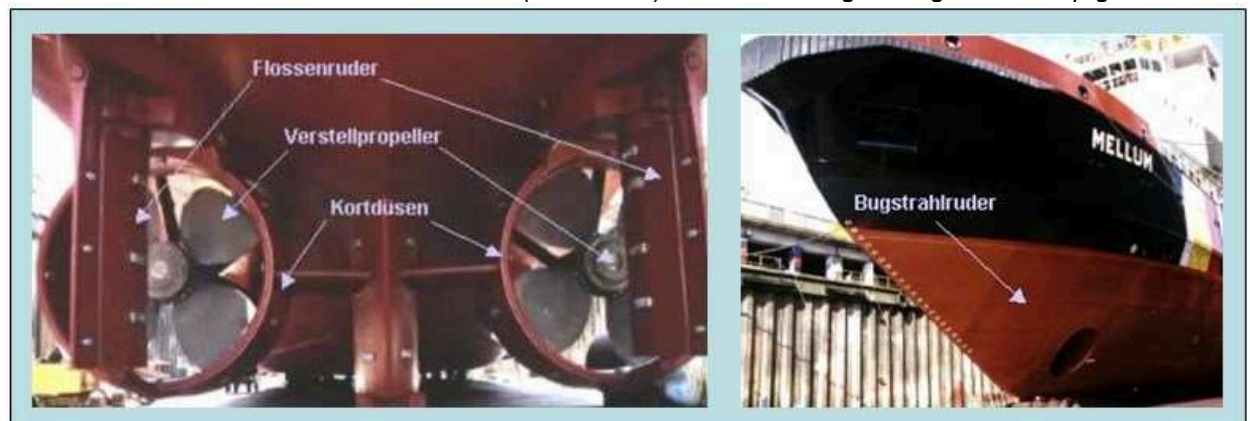


Bild 2: Aufnahmen des Unterwasserschiffs der Mellum (WSA-Wilhelmshaven) Bereich Binnenschifffahrt.

Bei der Uni Duisburg-Essen wurde ein Referenzschiff (Bild3) in Auftrag gegeben, das die Basis der Untersuchungen mit Binnenschiffen in diesem Projekt bilden wird.



*Bild 3: Modellschiff als Binnen-Referenzschiff (links: Bugbereich, rechts: Heckbereich)*

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Bearbeitung des Projekts ist leicht im Rückstand, die Bearbeitung im Jahr 2016 kann dennoch entsprechend dem Zeitplan durchgeführt werden.

- 2015: Auswahl der Testschiffe (je ein Binnen- und Seeschiff); Planung der benötigten Versuche; Literaturrecherche  
Aufsetzen numerischer Testfälle; Zusammenstellung einer Datenbank für Messwerte aus der Literatur und aus dem Projekt; Vorbereitungen für systematische Auswertungsroutinen
- 2016: Numerische Strömungs- und Manövrier-Rechnungen  
Planung und Durchführung Manövierversuche in der Großausführung Seeschiff  
Manövierversuche Seeschiff (Modell-Maßstab) freifahrend in der BAW in Hamburg  
Schlepptankversuche Seeschiff (Modell-Maßstab)
- 2017: Numerische Strömungs- und Manövrier-Rechnungen  
Manövierversuche Seeschiff (Modell-Maßstab) freifahrend in der BAW in Hamburg  
Schlepptankversuche Seeschiff (Modell-Maßstab)  
Auswertung aller Modellversuche mit Großausführungsmessungen und Zusammenfassung in Datenbank  
Auswertung aller numerischen Ergebnisse und Zusammenfassung in Datenbank
- 2018: Durchführung der systematischen Analyse der Maßstabsgesetze (Matlab & Datenbank)  
Bestimmung der Fehler bei Anwendung Maßstabsgesetze zur Übertragung Manövierverhalten in Großausführung  
Ableitung angepasster Übertragungsmethoden für spezielle Fragen der Kanal- und Revierfahrt  
Zusammenfassung und Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2018.

#### 5 Literatur

-/-

#### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Vorstudien zur Entwicklung eines rheologischen Moduls für UnTRIM**

**Netzplan-Nr.:** A39550370223

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. N. Winkel, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme II (K3)

**Bearbeiterin:** Dipl.-Ing. M. Naulin, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** norbert.winkel@baw.de, marie.naulin@baw.de

### **1 Problemdarstellung und Ziel**

Die Simulation des hoch komplexen Fließverhaltens von Flüssigschlick stellt weiterhin eine Herausforderung in der aktuellen Forschung und Entwicklung im Wasserbau im Küstenbereich dar. Zwar sind in den letzten Jahren einige Fortschritte in der Simulation der Flüssigschlickdynamik erzielt worden (z.B. Wehr, 2012), hinsichtlich der gegenseitigen Wechselwirkung zwischen Flüssigschlick und Wassersäule besteht jedoch weiterhin Forschungsbedarf. Das langfristige Ziel ist es ein rheologisches Modul für Simulationsverfahren wie z.B. UnTRIM zu entwickeln, welches auch die Interaktion von Flüssigschlick und Wassersäule berücksichtigt. Hierfür sind jedoch zunächst Vorstudien zwingend erforderlich: Basierend auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft werden vorhandene Modellansätze mithilfe von Laborversuchen validiert. In dem Forschungsprojekt soll eine erste Untersuchung der Interaktion von Flüssigschlick (Rheologie) und der darüber liegenden Wassersäule (Turbulenz) erfolgen. Zu diesem Zweck werden Laborversuche zur Turbulenz von granularen Suspensionen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen langfristig in einem numerischen Modell zur Nachbildung der Versuche implementiert und die Machbarkeit und Validität des numerischen Verfahrens analysiert werden. Anhand der Ergebnisse soll der weitere Forschungsbedarf und die nächsten Entwicklungsschritte zu Simulationsverfahren der Tidedynamik unter dem Einfluss von Flüssigschlick detailliert skizziert werden.

#### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Modellierung von frei fließenden, turbulenten Strömungen in Küstengewässern hat einen hohen Standard erreicht. Neben dem Transport turbulenter Eigenschaften können die Produktion und die Dissipation turbulenter kinetischer Energie mit sogenannten Zweigleichungsmodellen hinreichend genau erfasst werden. Zudem wurden die verschiedenen Zweigleichungsmodelle gerade durch deutsche Forschungsbeiträge (Burchard, 2001) in einem generischen Turbulenzmodell zusammengefasst. In solchen Turbulenzmodellen ist es auch möglich, den dämpfenden Einfluss von Dichteschichtungen durch die Salinität, den Feststoffgehalt oder die Temperatur zu berücksichtigen.

Die numerische Modellierung der Dynamik von Flüssigschlick hat mittlerweile einige Fortschritte erzielt, ist aber immer noch mit erheblichen physikalischen Defiziten verbunden. Den Stand der Wissenschaft im Jahr 2007 geben McAnally et al. (2007) wieder. Zunächst einmal stand dabei die Fließgrenze im Fokus der Aufmerksamkeit, die stark mit dem Feststoffgehalt steigt, aber auch von den Ruhezeiten des Schlicks abhängig ist. Flüssigschlick weist also ein komplexes thixotropes Verhalten auf: Innere Bindungen, z.T. auf biologischen Prozessen basierend, entwickeln sich mit der Zeit, können aber sehr schnell zerstört werden. Heute werden diese Prozesse durch die Einführung eines Strukturparameters nach dem Moore-Modell und weiterführend durch das Worall-Tuliani-Modell simuliert.

Im Rahmen dieses Projektes soll die Validität der vorhandenen Ansätze untersucht werden. Hierfür sind zunächst Laborversuche zur Turbulenzdämpfung von granularen Suspensionen zwingend erforderlich. Das Ergebnis der Validierung soll Grundlage für weitere Forschungsarbeiten sein. Anhand der Ergebnisse soll der weitere Forschungsbedarf und die nächsten Entwicklungsschritte zu Simulationsverfahren der Tidedynamik unter dem Einfluss von Flüssigschlick detailliert skizziert werden.

#### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Beim Ausbau und der Unterhaltung von Bundeswasserstraßen kommen morphodynamischen Entwicklungen eine zentrale Bedeutung zu, da sie die Nachhaltigkeit einer Maßnahme entscheidend bestimmen und den Umfang zukünftiger Unterhaltungsmaßnahmen beeinflussen.

An der Deutschen Küste ist es über die letzten Jahrzehnte zu einer zunehmenden Verschlickung in den Ästuaren gekommen. Insbesondere führt im Emsästuar die erhöhte Verschlickung in vielen Bereichen zu

hohen Unterhaltungsaufwendungen und schlechten ökologischen Zuständen. Um Unterhaltungsstrategien zu optimieren und Renaturierungsmaßnahmen zu entwickeln, wird eine Weiterentwicklung der Simulationsmethoden zur Beschreibung der Tidedynamik unter dem Einfluss von suspendierten Sedimenten bis hin zum Flüssigschlick dringend benötigt.

Aktuelle Fragestellungen an der Ems umfassen die Ausarbeitung des „Masterplans Ems 2050“. Um den ökologischen Zustand des Emsästuars langfristig zu verbessern, haben die Interessensgruppen an der Ems – das Land Niedersachsen, der Bund, vertreten durch die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, die Landkreise Emsland und Leer, die Umweltverbände sowie die Meyer Werft – Mitte dieses Jahres eine gemeinsame Absichtserklärung unterschrieben. Hierbei wird auch die Untersuchung von wasserbaulichen Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstoffeintrags in die Unterems, wie z.B. Tidepolder, Sohlschwelle oder Steuerung des Emssperrwerks, diskutiert.

Die Vorstudien zur Entwicklung eines rheologischen Moduls für UnTRIM stellen eine wesentliche Grundlage dar, die Veränderung der Tidedynamik von zukünftigen Maßnahmen unter dem Einfluss von Flüssigschlick analysieren zu können.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Untersuchungsziel sind Laborversuche zur Ermittlung der Turbulenzverhältnisse von granularen Suspensionen.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Die Untersuchungsmethoden beinhalten Laborversuche zur Analyse von Turbulenzverhältnissen in granularen Suspensionen. Hierfür wurden Messungen mit einem Rheometer für granulare Suspensionen mit unterschiedlichen Feststoffgehalten durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten durch eine Vergabe an einen externen universitären Partner (Universität der Bundeswehr München) und wurden von der BAW fachlich eng begleitet.

## **3 Ergebnisse**

Die Turbulenzsimulation in HN-Modellen erfolgt durch Turbulenzmodelle, wie beispielsweise ein k- $\epsilon$  Turbulenzmodell. Dabei werden nicht die einzelnen Wirbel aufgelöst, sondern die Effekte von Turbulenz betrachtet. Durch ein Turbulenzmodell wird demnach die Viskosität des Fluids um eine turbulente Viskosität ergänzt. Folglich wird die Zähigkeit von Wasser also künstlich erhöht.

In diesem Projekt wurden Viskositäten von Flüssigkeiten durch Analysen am Rheometer im Labor nachgemessen. Die Rheometermessungen wurden sowohl mit reinem Wasser wie auch mit granularen Suspensionen für unterschiedliche Feststoffgehalte durchgeführt. Ziel der Messungen war es durch gezielte Messeinstellungen, also sehr hohen Scherraten im CSR-Modus, turbulente Fließbedingungen im Messgerät zu erzeugen. Die Turbulenz - als wirbelndes, chaotisches Fließen - führt zu zusätzlichem Energieverlust, was in den Messergebnissen als Anstieg der Viskosität bzw. Zähigkeit zu erkennen ist.

In den Rheometerversuchen konnte in Abhängigkeit der Temperatur, des Spaltabstands und der Scherrate ein eindeutiger Anstieg der dynamischen Viskosität nachgewiesen werden. Dies bestätigt die Theorie der Viskositätssteigerung mit Hilfe von Turbulenzmodellen. In weiteren Messungen wurden granulare Suspensionen mit „Nanopearls“ hergestellt. Es erfolgte eine gezielte Verwendung von Nanopearls, da sie eine Dichte vergleichbar mit der von Wasser haben. Somit sollte ein mögliches Absetzverhalten im Messspalt verhindert sowie der Einfluss der Dichte zunächst vernachlässigt werden.

Es wurde der Fragestellung nachgegangen, wie granulare Suspensionen die Entwicklung von Turbulenz beeinflussen. Hierfür wurden gleichartige Messungen mit Feststoffgehalten von 2.5%, 5%, 7.5% und 10% durchgeführt. Die Ergebnisse einer Viskositätskurve sind beispielhaft in Bild 1 dargestellt. Es lässt sich ein logischer Anstieg der Gesamtviskosität mit höherem Feststoffanteil erkennen. Zusätzlich ist ein „früherer“ Beginn von turbulenten Fließverhältnissen (also bei kleineren Scherraten) mit geringerem Feststoffanteil bemerkbar (siehe roter Pfeil im Bild 1). Im Rahmen der Versuche wurden die Reynoldszahlen bestimmt, die den Übergang von laminarem zu turbulentem Verhalten beschreiben. Mit steigen-

dem Feststoffgehalt wird der Einfluss der turbulenten Viskosität gehemmt („turbulence damping“), während sich jedoch der Einfluss der rheologischen Viskosität erhöht. In zukünftigen Forschungsprojekten, in dem der kontinuierliche Modellansatz die Grundlage ist, können diese Voruntersuchungen als eine erste Bestätigung des Modellansatzes interpretiert werden. Weiterhin erfolgte eine numerische Implementation einer Couette- Strömung (Rheometerströmung) in ein vertikales 1D-Modell.

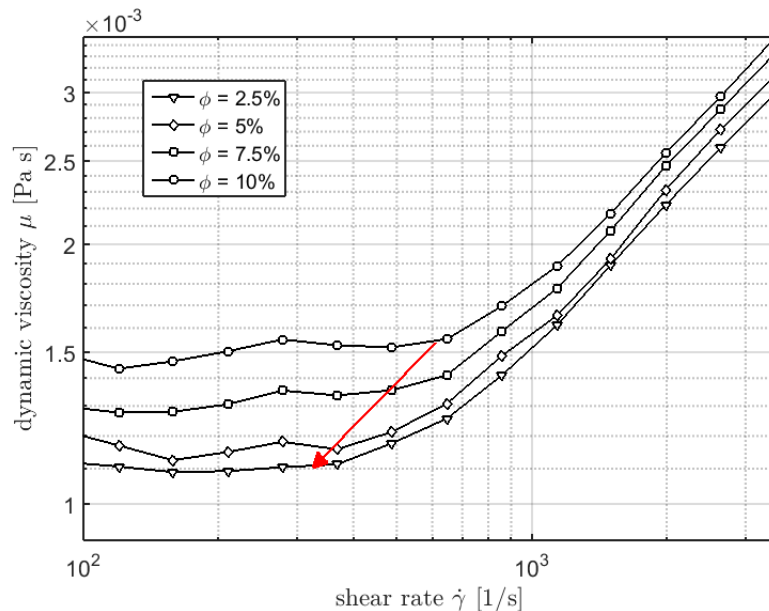


Bild 1: Viskositätskurve für unterschiedliche Feststoffgehalte  $\Phi$  (2,5%, 5%, 7,5%, 10%).

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Beschreibung der Arbeitspakete (AP):

- **AP 1:** Entwicklung eines rheologischen Versuchs zur Analyse von Turbulenzverhältnissen in granularen Suspensionen
- **AP 2:** Durchführung der Versuche mit granularen Suspensionen ohne Absetzeffekte (Feststoffdichte etwa Wasserdichte)
- **AP 3:** Analysen zur Validität verschiedener Kopplungsmöglichkeiten von Turbulenz- und rheologischen Modellen

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2016.

#### 5 Literatur

- Burchard, H. (2001): Simulating the Wave-Enhanced Layer under Breaking Surface Waves with Two-Equation Turbulence Models, J. Phys. Oceanogr. 31, 3133-3145, 2001.
- McAnally, W.H., Friedrichs, C., Hamilton, D., Hayter, E., Shrestha, P., Rodriguez, H., Sheremet, A., Teeter, A. (2007): Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays, and Lakes. I: Present State of Understanding on Character and Behavior. J. Hyd. Engng, 133(1), 9-22, 2007.
- Wehr, D. (2012): An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics. Dissertation, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, Mitteilungen, Heft 115, 2012.
- Wehr, D.; Malcherek, A. (2012): Numerical simulation of fluid mud dynamics – The isopycnal model MudSim. Die Küste, 79, 2012.

#### 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Deutsches Küstenmodell**

**Netzplan-Nr.:** A39550370227

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. N. Winkel, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme II (K3)

**Bearbeiterin:** R. Seiffert, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** norbert.winkel@baw.de, rita.seiffert@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die Modellgebiete der hydrodynamisch numerischen Ästuarmodelle von Ems, Jade-Weser und Elbe beschränken sich auf die Ästuar selbst. Der seeseitige Modellrand liegt im Mündungsbereich des jeweiligen Ästuars. Prozesse außerhalb der Modellgrenzen und Wechselwirkungen der Ästuar untereinander können bisher nur mit dem relativ grob aufgelösten Nordseemodell betrachtet werden. Für eine detaillierte Modellierung dieser Prozesse sowie zur Untersuchung von wasserbaulichen Maßnahmen im Mündungsbereich ist ein höher aufgelöstes Modell der Deutschen Bucht einschließlich der Ästuar notwendig. Aufgrund der heute leistungsfähigeren Rechner und gestiegenen Speicherkapazitäten ist es prinzipiell möglich, größere Modellgebiete in einer adäquaten Auflösung abzubilden. Die Erfahrungen aus den an der BAW gelaufenen Projekten AufMod, Optel, KLIWAS und Klimzug-Nord bilden eine Grundlage für die Projektbearbeitung.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Entwicklung eines hochaufgelösten Küstenmodells wäre von großem Nutzen für die WSV. Es ermöglicht z.B. detaillierte Untersuchungen wasserbaulicher Maßnahmen im Mündungsbereich der Ästuar, der Wechselwirkung der Ästuar untereinander, der Transportprozesse in der Deutschen Bucht und zum Einfluss des Klimawandels auf die Region. Die Ergebnisse des Projektes unterstützen die laufenden Arbeiten u.a. zum Sedimentmanagement im Elbeästuar, zum Ems-Masterplan 2015 und zum Eider-Sperrwerk, welche für die WSV von Bedeutung sind.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel des Projekts ist der Aufbau eines hydrodynamisch-numerischen 3D-Modells der Deutschen Bucht. Das Modell soll die Ästuar Ems, Jade-Weser und Elbe enthalten. Es soll die Hydrodynamik und Transportprozesse von Salz, Temperatur und Schwebstoff berechnen. Die Auflösung kann deutlich feiner als die des vorhandenen Nordseemodells der BAW sein.

Mit dem Küstenmodell können alle Ästuar gleichzeitig und einheitlich mit den gleichen Randbedingungen simuliert werden. Aufgrund des weit in der Nordsee gelegenen seeseitigen Rands können Auswirkungen möglicher wasserbaulicher Maßnahmen in den Mündungsbereichen besser betrachtet werden. Die Verwendung eines größeren Modellgebiets vereinfacht auch die Simulation extremer Ereignisse mit sehr hohem Oberwasserzufluss, da der weiter in der Nordsee gelegene seeseitige Rand vom Oberwasserzufluss unbeeinflusst ist.

Nach Bedarf können für die Ästuar Teilgitter mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung erstellt werden. Je nach Untersuchungsgegenstand können dann die hoch- oder niedrigaufgelösten Teilgitter in das Deutsche-Bucht-Modell eingebunden werden. Dies würde zu einer Optimierung der Rechendauer und Speicheranforderungen beitragen.

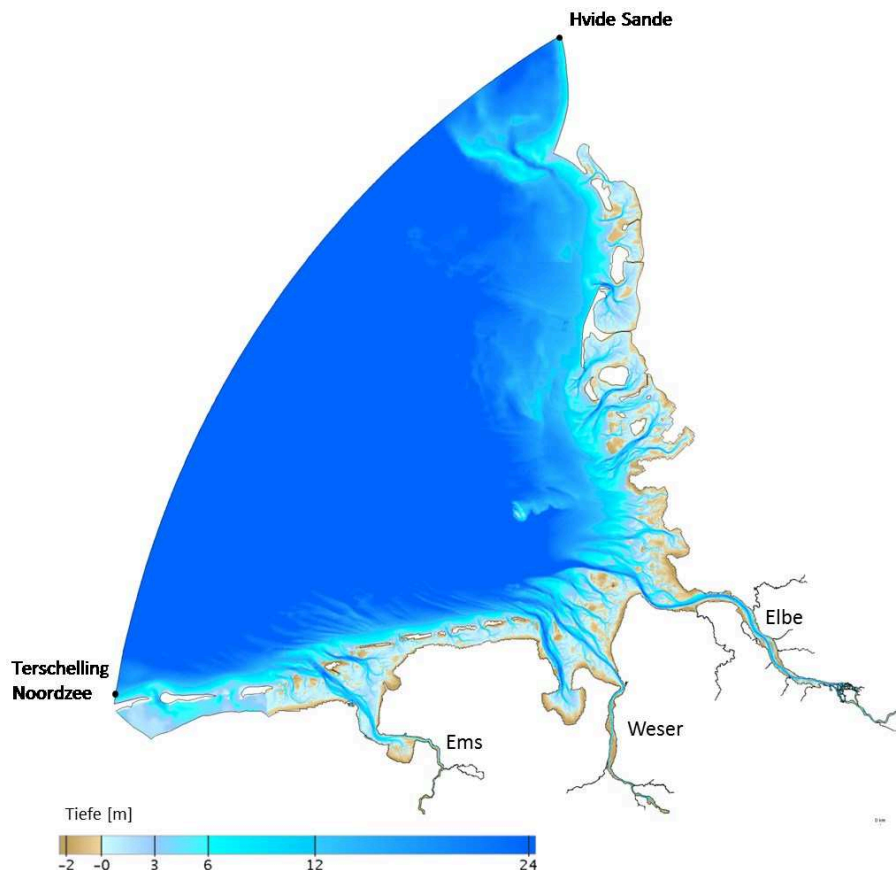
## **2 Untersuchungsmethoden**

Es werden die mathematischen Verfahren UnTRIM2007 (Casulli und Walters, 2000) und UnTRIM2009 (Casulli und Stelling, 2011) verwendet. Eine zentrale Frage in diesem Projekt ist die Wahl der Lage des seeseitigen Modellrandes. Dieser soll so gewählt werden, dass alle genannten Ästuar im Modell enthalten sind. Eine möglichst exakte Steuerung des seeseitigen Rands ist die grundlegende Voraussetzung für die Kalibrierung und Validierung des Modells. Dadurch dass alle Ästuar in dem Modellgebiet enthalten sind, müssen die Randbedingungen nur einmal erzeugt werden und nicht wie bisher für jedes Ästuarmodell einzeln. Im Projekt soll ein Konzept erstellt werden, welches eine verlässliche, und möglichst einfache Randsteuerung auf Grundlage vorhandener Dauermess- und Pegelstandorte ermöglicht.



### 3 Ergebnisse

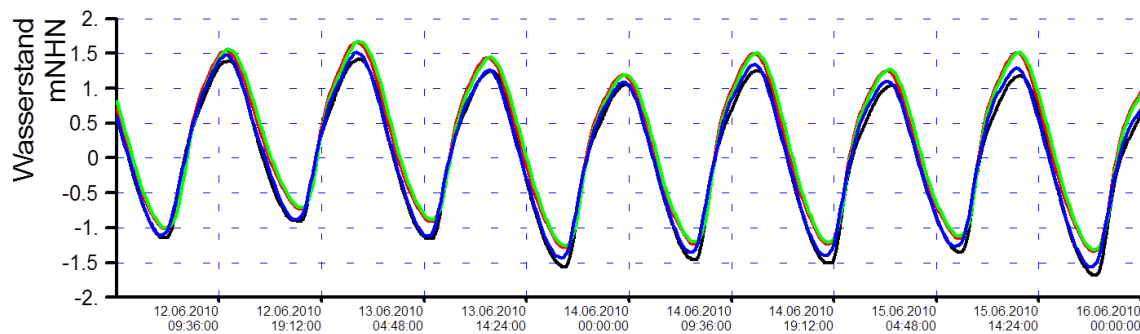
Bild 1 zeigt das gewählte Modellgebiet für das Deutsche Küstenmodell. Das Modellgebiet umfasst die gesamte deutsche Nordseeküste inklusive der Ästuarie von Elbe, Weser und Ems. An der niederländischen Küste erstreckt es sich bis zum Pegel Terschelling Noordzee und an der dänischen Küste bis zum Pegel Hvide Sande. Es wurde jeweils ein Modellgitter für das mathematische Verfahren UnTRIM2007 und das mathematische Verfahren UnTRIM2009 erstellt. Im Gegensatz zu UnTRIM2007 kann in UnTRIM2009 die Topographie mit Hilfe der Subgrid-Technologie unterhalb der Auflösung des Berechnungsgitters mit großer Genauigkeit beschrieben werden.



**Bild 1:** Modellgebiet des Deutschen Küstenmodells

In einem ersten Schritt wurden für den seeseitigen Rand Wasserstands- und Salzgehaltszeitreihen aus einer Modellsimulation des Nordseemodells eingesteuert. Dieses Vorgehen liefert erste gute Ergebnisse. Da die Ergebnisse des Nordseemodells aber teilweise deutliche Abweichungen zu den Messungen aufweisen, ist dieses Vorgehen für eine naturnahe Kalibrierung des Deutschen Küstenmodells nicht optimal.

Die Stützstellen entlang des Modellrands mithilfe der Messzeitreihen der Pegel Hvide Sande oder Terschelling Noordzee zu korrigieren, brachte keine Verbesserung. Generell ist es sinnvoll nur die Stützstellen, die in der Nähe zu Terschelling Noordzee oder Hvide Sande liegen, in eine Korrektur einzubeziehen. Eine Simulation, in der der Messpegel Terschelling Noordzee als zusätzlicher Stützpunkt für die Randwertinterpolation verwendet wurde, liefert an der niederländischen und ostfriesischen Küste verbesserte Ergebnisse (Bild 2, blau).



**Bild 28:** Wasserstandskurve am Pegel Borkum Südstrand, Vergleich zwischen Messung (schwarz) und Modell (grün: UnTRIM2009 Randwerte aus dem Nordseemodell, rot: UnTRIM2007 Randwerte aus dem Nordseemodell, blau: UnTRIM2007 Randwerte aus dem Nordseemodell und Terschelling Noordzee als zusätzlicher Stützpunkt)

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016:

- Randwertgenerierung/-korrektur verbessern
- Modellkalibrierung

2017:

- Anwendungsbeispiele testen
- Veröffentlichung der Ergebnisse

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2017.

#### 5 Literatur

Casulli, V., Walters, R. A. (2000): An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Volume 32, Issue 3, S. 331–348.

Casulli, V., Stelling, G. S. (2011): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Volume 67, Issue 4, S. 441-449.

#### 6 Veröffentlichungen

-/-



## **Ein 3D biogeochemischen Modell für die Tideelbe**

**Netzplan-Nr.:** A39550370228

**Projektleiter:** Dr. rer. nat. N. Winkel, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3)

**Bearbeiter/in:** Dipl.-Ing. I. Holzwarth, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)  
Dr. rer. Nat. L. Nickelsen, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme II (K3),

**E-Mail:** norbert.winkel@baw.de; ingrid.holzwarth@baw.de; levin.nickelsen@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Anthropogene Einflüsse auf die Küstenwasserstraßen durch Ausbauten sowie Unterhaltungsmaßnahmen stehen immer in Wechselwirkung mit biologischen Prozessen, die daher in die Simulationsmethoden mit einbezogen werden müssen. Es ergeben sich verschiedene Fragestellungen durch den möglichen Einfluss von wasserbaulichen Veränderungen auf die Konzentrationen organischer Partikel. Durch den Abbau organischer Partikel können die Sauerstoffkonzentrationen in den Ästuaren auf Werte absinken, die ökologische Auswirkungen haben können. Hierdurch sind beispielsweise die Populationen und Habitate von Fischpopulationen betroffen. Biogene Stoffe sind außerdem immer auch Bestandteil der Schwebstofffracht und lagern sich gegebenenfalls zusammen mit abiotischen Partikeln im Sediment ab und beeinflussen so Sedimenttransport und Morphodynamik. Insbesondere soll die Wechselwirkung von biogenen Partikeln mit Sedimenten nicht biologischen Ursprungs hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Flokkulation betrachtet werden. Veränderungen der biologischen Prozesse und ihrer Wechselwirkungen sind außerdem auch aufgrund von Klimaveränderungen denkbar. Zur Untersuchung dieser Prozesse sind die bestehenden ein- und zweidimensionalen Gewässergütemodelle auf ein dreidimensionales biogeochemisches Modell der Tideelbe zu erweitern und Methoden zur Analyse, Visualisierung und Validierung der Simulationsergebnisse zu entwickeln.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Eine Betrachtung biogeochemischer Prozesse zusätzlich zu den physikalischen Prozessen in Ästuaren ist notwendig, um die Wirkung von biologischen und chemischen Vorgängen auf Sedimentablagerungsprozesse und auf umweltrelevante Größen wie Sauerstoffkonzentrationen mit in die Analysen einzubeziehen. Es wird perspektivisch möglich sein, anthropogene Eingriffe einheitlich hinsichtlich ihrer biogeochemischen und physikalischen Auswirkungen auf das Ästuar zu untersuchen.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Langfristiges Ziel ist die gekoppelte Simulation von biogeochemischen und physikalischen Prozessen in der Tideelbe zur Beschreibung von gelösten, partikulären und sedimentgebundenen Größen mit einem validierten, dreidimensionalen, biogeochemischen Modell. Bei den zu betrachtenden Größen handelt es sich hierbei um gelösten Sauerstoff, anorganische Nährstoffe, Phytoplankton, Detritus und mineralische Feinsedimente.

## **2 Untersuchungsmethoden**

Mit Hilfe des Delwaq-Moduls (Deltares, 2013) werden biogeochemische Modelle entwickelt und weiterentwickelt. Diese werden an ein neu aufgesetztes dreidimensionales physikalisches Modell der Tideelbe mit einer hohen vertikalen und horizontalen Auflösung gekoppelt und getestet. Für die Analyse der Ergebnisse werden *Postprocessing-Tools* entwickelt und weiterentwickelt, die sowohl für die biogeochemischen als auch für die physikalischen Ergebnissgrößen geeignet sind und somit eine integrierte Betrachtung gewährleisten können. Weiterhin werden die biogeochemischen Simulationsdaten so aufbereitet, dass die in der BAW bestehenden *Postprocessing-Tools* zur Analyse verwendet werden können. Zur Validierung der Modelle werden die gesammelten Messdaten der Tideelbe aus dem vorangegangenen Projekt „Interaktion von Größen des Sedimenttransports und der Wasserqualität in dreidimensionalen Ästuarmodellen“ genutzt und gegebenenfalls erweitert.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Aufsetzen eines dreidimensionalen physikalischen Modells Tideelbe mit Subgridbathymetrie

Für die dreidimensionalen biogeochemischen Simulationen ist ein Modell der Tideelbe mit Subgrid-Bathymetrie aufgesetzt worden. Ein Programm zur Visualisierung von Taylordiagrammen (Taylor, 2001) ist als zusätzliches Postprocessing-Tool entwickelt worden und auf Wasserstandsdaten angewendet worden (siehe Bild 1). Das Taylordiagramm zeigt große Korrelationen und sehr ähnliche Standardabweichungen zwischen Messungen und Simulation und damit eine gute Übereinstimmung. Die Möglichkeit zur Validierung und Kalibrierung durch Taylordiagramme wird auch für biogeochemische Größen verfügbar gemacht.

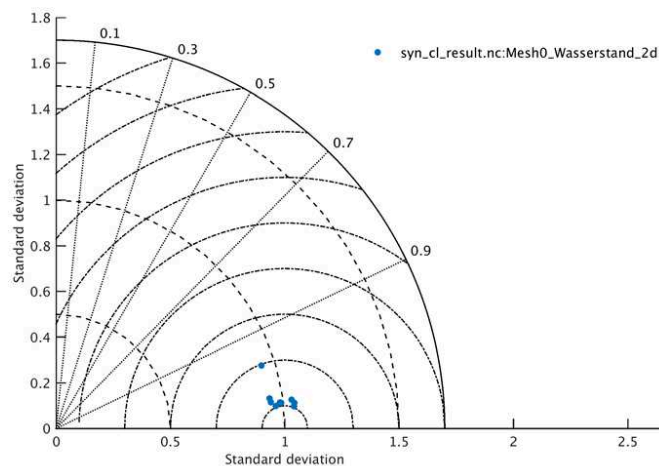


Bild 1: Taylordiagramm (Taylor, 2001) zum Vergleich von simulierten und gemessenen Werten des Wasserstands.

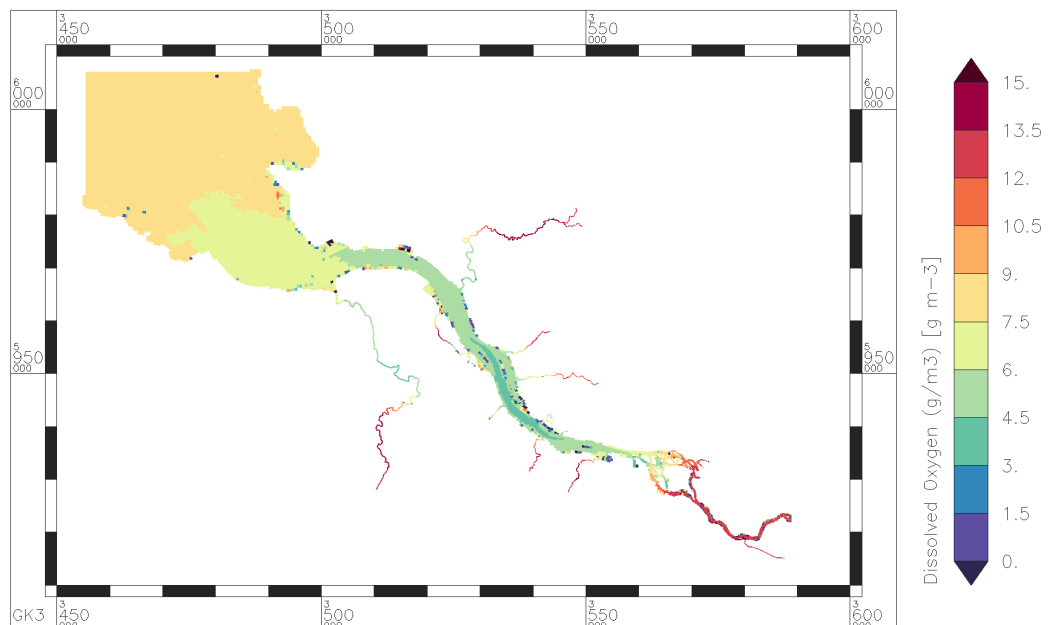


Bild 2: Räumliche Verteilung des über die Tiefe gemittelten gelösten Sauerstoffs in der Tideelbe aus einer vorläufigen dreidimensionalen biogeochemischen Modellkonfiguration vom 19.06.2010.

### 3.2 Entwicklung von biogeochemischen Modellen

Die simulierte Verteilung des gelösten Sauerstoffs mit einer vorläufigen dreidimensionalen biogeochemischen Modellkonfiguration zeigt Konzentrationen in realistischen Bereichen und die häufig beobachteten niedrigen Sauerstoffkonzentrationen im Gebiet stromabwärts vom Hamburger Hafen (siehe Bild 2).

### 3.3 Entwicklung von Postprocessing-Tools zur Analyse und Visualisierung der biogeochemischen Simulationsergebnisse

Das Tool zur Visualisierung von Taylordiagrammen (Bild 1) umfasst zusätzlich die Möglichkeit zur Berechnung von optional über Messstationen gemittelten Werten zur Berechnung der Modellgüte.

Ein Tool zur einfachen und automatisierbaren Darstellung von Zeitreihen aus den von Delwaq bereitgestellten ugrid-konformen CF-NetCDF-Dateien befindet sich in der Entwicklung.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2016:

- Entwicklung einer ersten, vollständigen Version der Postprocessing-Tools
- Validierung und Kalibrierung einer ersten Version eines 3D-Tideelbmodells
- Sensitivitätsanalysen zur Identifikation von Schlüsselparametern und –prozessen
- Erprobung der von Delwaq bereitgestellten Phosphat-Adsorptions/Desorptions-Prozesse

2017:

- Implementierung und Verifizierung eines Flokkulationsmodells
- Implementierung und Verifizierung eines biogeochemischen Sedimentmodells
- Entwicklung von integralen Größen zur biogeochemischen Charakterisierung des Ästuars
- Validierung und Kalibrierung der weiterentwickelten Version des 3D-Tideelbmodells
- Veröffentlichung der Ergebnisse
- Weiterentwicklung der Postprocessing-Tools

2018:

- Veröffentlichung der Ergebnisse
- Validierung und Kalibrierung der weiterentwickelten Version des 3D-Tideelbmodells
- Weiterentwicklung der Postprocessing-Tools
- Identifikation der notwendigen Schritte zur Online-Kopplung von UnTRIM und Delwaq unter Einbeziehung subgrid-spezifischer Herausforderungen

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2018.

## 5 Literatur

Deltares (2013) D-Water Quality Process Library Description – Technical Reference Manual. Delft, The Netherlands

Taylor, K. E. (2001) Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, Journal of Geophysical Research 106 (D7), S. 7183. DOI: 10.1029/2000JD900719.

## 6 Veröffentlichungen

-/-

## **Verbundprojekt MudEstuary**

### **Die Beeinflussung der Dynamik der Tideästuare durch Flüssigschlick**

#### **Teilprojekt MudEstuary\_B: Numerische Simulation des Emsästuars**

**KFKI Forschungsvorhaben, gefördert durch das BMBF (Förderkennzeichen: 03KIS113)**

**Netzplan-Nr.:** A39550370235

**Projektleiter:** Dipl.-Ing. H. Rahlf, Wasserbau im Küstenbereich

**Bearbeiterin:** Dipl.-Ing. M. Naulin, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme II (K3)

**E-Mail:** holger.rahlf@baw.de, marie.naulin@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

Die Beeinflussung der Dynamik der Tideästuare durch Flüssigschlick mit dem Fokus auf einer Analyse der Interaktion des Flüssigschlicks mit der Wassersäule ist das Hauptziel des KFKI-Verbundprojekts MudEstuary, welches in Kooperation mit der Universität der Bundeswehr in München bearbeitet wird.

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Das Auftreten von Flüssigschlick in Ästuaren und angrenzenden Häfen kann zu hohen Unterhaltungsaufwendungen und einer Veränderung der Tidedynamik führen. In den klassischen hydrodynamisch-numerischen Modellen ist die Wechselwirkung zwischen Tidedynamik und Flüssigschlick bisher kaum berücksichtigt. Eine Weiterentwicklung der Methoden zur Beschreibung der Flüssigschlickdynamik erfolgte in vorangegangenen KFKI-Projekten: So wurde im Projekt MudSim (Wehr & Malcherek, 2012) ein numerischer Modellansatz entwickelt, der basierend auf einer isopyknischen Darstellung das komplexe nicht Newtonsche Verhalten von Flüssigschlick beschreiben kann (Wehr, 2012). Dafür wurden das scherverdünnende Fließverhalten von Flüssigschlick und die rheometrische Untersuchung der Fließgrenze untersucht (Malcherek & Cha, 2011). Dieses Modell beschreibt die komplexen rheologischen Eigenschaften der Schlickes, jedoch nicht die vertikale Interaktion einzelner Schichten. In Roland et al. (2012) wurde das Modul FLMUD zur Simulation der Flüssigschlickdynamik entwickelt, welches auf kartesischen Koordinaten basiert. Das Modul wurde qualitativ mit numerischen Experimenten validiert. Eine detaillierte Anwendung und Validierung auf ein Ästuar sowie eine quantitative Evaluierung des Ansatzes sind jedoch noch erforderlich.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

An der Deutschen Küste ist es über die letzten Jahrzehnte zu einer zunehmenden Verschlickung in den Ästuaren gekommen. Insbesondere das Emsästuar ist von hohen Schwebstoffkonzentrationen bis zu  $300 \text{ kg/m}^3$  und Flüssigschlickschichten bis zu einer Mächtigkeit von 2 m betroffen (Schrottke, 2006). Besonders gravierend ist dabei die Tatsache, dass die rheologische Viskosität einer hochkonzentrierten Suspension oder einer Flüssigschlickschicht mit einer sehr geringen Rauheit verbunden sein kann, die auf den darüber strömenden Wasserkörper wirkt. Ist der Flüssigschlick selbst als Flut- oder Ebbeströmung in Bewegung, so kann die rheologische Viskosität deutlich geringer als die einer ungedämpften turbulenten Strömung sein. Für das Fortschreiten einer Tidewelle kann dies eine Erhöhung der Fortschrittsgeschwindigkeit bedeuten. Es kann daher passieren, dass die Gezeitendynamik in einem schlickhaltigen Ästuar weniger gedämpft wird als in einem turbulent strömenden Ästuar. Dieser Effekt hat das Systemverhalten der Ems über die letzten Jahrzehnte deutlich verändert. Obwohl die Wassertiefen außerhalb der unterhaltenen Fahrrinne in der Unterems durch den Stromauftransport und Ablagerungen von Schwebstoffen abgenommen haben, hat sich die Fortschrittsgeschwindigkeit des Thw-Scheitels von Pogum bis Papenburg verdoppelt (BAW, 2000). Unter besonderen Randbedingungen kann das Thw bei Papenburg früher als in Pogum eintreten. Dieses sind Phänomene, die auch auf ein unterschiedliches Fließverhalten zwischen Wasser- und Schlickkörper hinweisen können. Um Ursachen und die Entwicklung zu diesem Systemverhalten zu analysieren, ist es notwendig, die prozessübergreifende Modellierung der turbulenten und rheologischen Viskosität einschließlich der Übergänge zwischen diesen Zuständen zu entwickeln und in einem numerischen Modell umzusetzen. Dieses wird sowohl für die Beschreibung des derzeitigen Zustands der Ems sowie für vergangene Zustände der letzten Jahrzehnte notwendig sein. Darauf aufbauend ermöglicht das prognostische numerische Verfahren die Entwicklung neuer Lösungsansätze durch ein vertieftes Prozessverständnis. Das langfristige Ziel ist es,

notwendige Vorhaben zur Verringerung der Verschlickungsproblematik für das Gesamtsystem Ems prognostisch abzusichern.

### 1.3 Untersuchungsziel

Das Ziel des Forschungsprojekts MudEstuary ist eine Methode zur Beschreibung der Interaktion von Tide und Flüssigschlick zu entwickeln. Für eine Validierung werden Laborversuche und numerische Simulationen durchgeführt. Um die Dynamik in Tideästuaren mit Flüssigschlick beschreiben zu können, wird hierfür ein Modellansatz entwickelt und implementiert, der einen kontinuierlichen Übergang von Flüssigschlick zu geringeren Schwebstoffkonzentrationen berücksichtigt (Bild 1). Dabei wird das viskose Verhalten von Wasser durch Turbulenzmodelle und das visko-elastische Verhalten von Flüssigschlick durch rheologische Modelle simuliert.

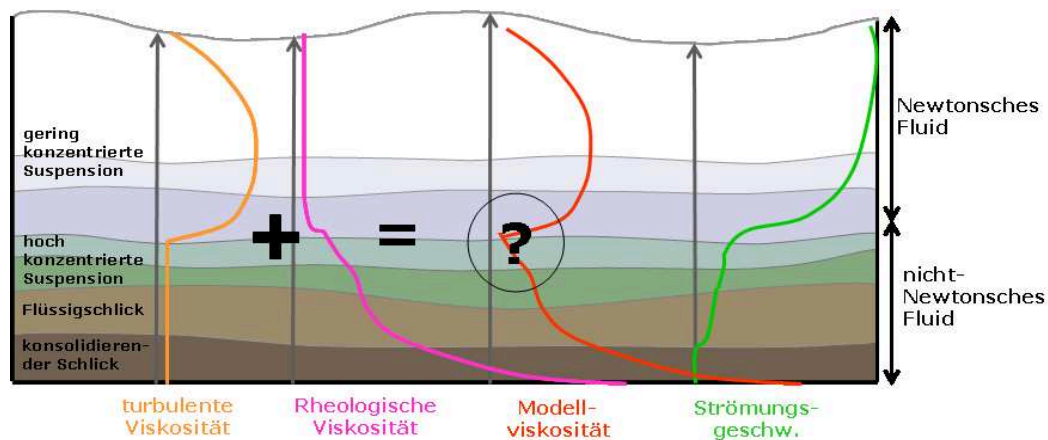


Bild 1: Schematische Darstellung der turbulenten und rheologischen Viskosität sowie der Modellviskosität in Abhängigkeit von der Schwebstoffkonzentration.

## 2 Untersuchungsmethoden

Basierend auf einem kontinuierlichen Modellansatz (Bild 1) wird zunächst ein linearer Zusammenhang der turbulenten und rheologischen Viskosität angenommen (Le Hir et al., 2001). So kann die effektive Viskosität  $\nu_{eff}$  eingeführt werden, die sowohl die turbulente ( $\nu_t$ ) wie auch die rheologische Viskosität ( $\nu_{rh}$ ) beinhaltet:  $\nu_{eff} = \nu_t + \nu_{rh}$

Im Teilprojekt MudEstuary\_A (UniBwM) werden in eigens entwickelten Laborversuchen zur Turbulenzdämpfung in geschichteten Schlicksuspensionen rheologische und turbulente Viskositäten gemessen und mittels Modellviskositätsansatz zur Validierung nachgerechnet. Des Weiteren wird der Einfluss der Salinität und der biologischen Aktivität auf die Rheologie der Flüssigschlicke untersucht.

Im Teilprojekt MudEstuary\_B (BAW) wird der entwickelte Modellansatz in einem numerischen Modell implementiert. Es findet eine Anwendung und Validierung auf das Emsästuar statt. Weiterhin werden historische Zustände der Ems und die Ursachen der Verschlickung analysiert.

## 3 Ergebnisse

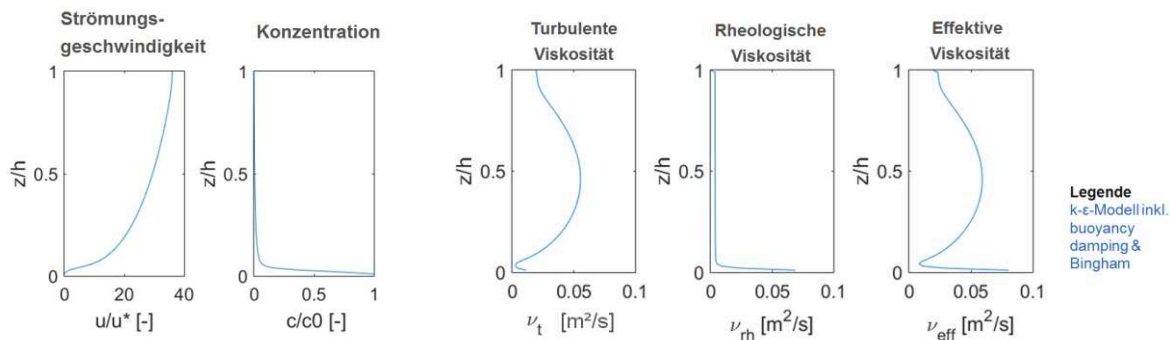
### MudEstuary\_B: Zwischenergebnisse des Arbeitspakets 1

Im Teilprojekt MudEstuary\_B erfolgte zunächst die Ausarbeitung und Entwicklung eines detaillierten Arbeitskonzepts sowie die Erstellung einer Literaturrecherche und Dokumentation zu rheologischen Grundlagen, Entrainment und Konsolidierung.

Im Rahmen der Weiterentwicklung des Simulationsmodells wurde ein erster Ansatz zur Kombination von Turbulenz und rheologischem Modell implementiert. Es erfolgte ein Aufbau eines 1D vertikalen Modells in Matlab mit Implementierung eines kontinuierlichen Modellansatzes unter Berücksichtigung folgender Komponenten:

- Turbulenzmodell (k-epsilon)
- rheologische Viskosität mit Bingham-Parametrisierung
- Buoyancy damping
- Randbedingungen unter Berücksichtigung von kohäsiven Sedimenten bzw. laminarem Fließverhalten am Boden
- Analyse der Anforderungen an die Diskretisierung (Ort, Zeit)

Die Zwischenergebnisse des Simulationsmodells unter Berücksichtigung eines kontinuierlichen Modellansatzes mit Angaben zu den vertikalen Profilen der Strömungsgeschwindigkeit, Konzentration sowie der turbulenten, rheologischen und effektiven Viskosität zeigt Bild 2.



**Bild 2:** Zwischenergebnisse des Simulationsmodells unter Berücksichtigung eines kontinuierlichen Modellansatzes mit Angaben zu den vertikalen Profilen der Strömungsgeschwindigkeit, Konzentration sowie der turbulenten, rheologischen und effektiven Viskosität.

#### 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

BMBF-Förderung: 01.06.2015 – 31.12.2018 (inkl. 7 Monate kostenneutraler Verlängerung)  
Abschlussbericht und Dokumentation: 01.01.2019 – 31.06.2019

##### **MudEstuary\_B: Arbeitspakete (AP):**

###### **AP 1: 05/2015 – 12/2016**

Konzeption und Literaturrecherche & Weiterentwicklung Simulationsmodell

###### **AP 2: 07/2016 – 09/2017**

Anwendung Simulation auf Labormodell / Emsmodell & Integration Viskositätsmodell

###### **AP 3: 10/2017 – 09/2018**

Anwendung Emsmodell und historische Zustände

###### **AP 4: 10/2018 – 12/2018**

Finale Auswertung

###### **AP 5: 01/2019 – 06/2019**

Abschlussbericht, Veröffentlichungen

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2019.

#### 5 Literatur

- BAW (2000): Verifikation des Emsmodells 1998 sowie die Analyse und Synthese des Wasserstandes in der Unterems. Sachstandsbericht BAW-Nr. 98 53 3455, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. Unveröffentlicht, 2000.
- Malcherek, A. & Cha, H (2011). Zur Rheologie von Flüssigschlick: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Ansätze. Projektbericht, Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen.
- Le Hir, P. et al. (2001). Application of the continuous modelling concept to simulate high-concentrated suspended sediment in a macrotidal estuary. In: McAnally W.H. and A.J. Mehta (Hg.): Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes, 3: Elsevier Science, 229-247.

- Roland, A., Ferrarin, C., Bellafiore, D., Zhang, Y.J., Sikric, M.D., Zanke, U., Umgieser, G. (2012): Über Strömungsmodelle auf unstrukturierten Gitternetzen zur Simulation der Dynamik von Flüssigschlick. *Die Küste*, 79, 53-82.
- Schrottke, K. (2006). Dynamik fluiden Schlickes im Weser und Ems Ästuar – Untersuchungen und Analysen zum Prozessverständnis. BAW/BfG-Kolloquium Nov. 2006.
- Wehr, D (2012). *An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics*. PhD Thesis. Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen.
- Wehr, D. & Malcherek, A. (2012): Numerical Simulation of Fluid Mud Dynamics – The isopycnal Model MudSim. *Die Küste*, 79, 1-52.

## 6 Veröffentlichungen

- Naulin, M.; Chmiel, O.; Malcherek, A. (2015). Combining turbulence and mud rheology in a numerical 3D-model of the Ems Estuary, in: Toorman, E.A. et al. (Ed.) (2015). INTERCOH2015: 13th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes. Leuven, Belgium, 7-11 September 2015. VLIZ Special Publication, 74: pp. 84-85
- Chmiel, O.; Malcherek, A.; Naulin, M.; Rahlf, H. (2015): MudEstuary – Die Beeinflussung der Dynamik der Tideästuare durch Flüssigschlick (03KIS112, 03KIS113); 20. KFKI Seminar zur Küstenforschung, 25. November 2015, Bremerhaven.

## Danksagung

Das Verbundprojekt MudEstuary wird als Forschungsvorhaben des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Förderkennzeichen 03KIS113 gefördert und bei der Durchführung sowie Abwicklung durch den Projektträger Jülich (PtJ) unterstützt.

**Projekt FWII: Early Dike, Vorhaben: Nutzung der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland zur Kommunikation - Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN**

**Netzplan-Nr.:** A39550670403

**Projektleiter:** Dr.-Ing. R. Lehfeldt, Dienststelle Hamburg, Geschäftsstelle KFKI

**E-Mail:** rainer.lehfeldt@baw.de

## **1 Problemdarstellung und Ziel**

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines sensor- und risikobasierten Frühwarnsystems, das mehrere Belastungsgrößen (z. B. Wasserstand, Wind und Wellen) sowie die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks berücksichtigt. Am Beispiel von Seedeichen soll der Aufbau eines GeoPortals erfolgen, das dem Endnutzer zuverlässige Echtzeitdaten zum Zustand des Bauwerks und zu allen äußeren Belastungen zur Verfügung stellt. Auf Grundlage dieser Daten kann unter Einbeziehung aller relevanten Prozesse rechtzeitig gewarnt und im Katastrophenfall ein effektives Katastrophenmanagement durchgeführt werden.

Die Marine Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) soll für die Kommunikation in diesem neuen innovativen sensor- und risikobasierten Frühwarnsystem unter Verwendung aktueller OGC Standards zur Datenbeschreibung (Observation and Measurement) und zum Datenaustausch (Sensor Observation Service) in einer aufzubauenden Sensor- und Geodaten-Infrastruktur (SGDI) genutzt werden.

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

See- und Ästuardeiche zählen zu den wichtigsten Küstenschutzanlagen in Deutschland und ein Versagen der Bauwerke hat meist schwerwiegende Konsequenzen zur Folge. Überflutungen in niedrig gelegenen Küstengebieten forderten in den vergangenen Jahren weltweit eine hohe Anzahl an Menschenleben und verursachten große wirtschaftliche Schäden. Allein in Deutschland schützen Seedeiche mit einer Gesamtlänge von 1.200 km mehr als 2,4 Millionen Menschen in den Küstengebieten Niedersachsens, Schleswig-Holsteins, Bremens, Hamburgs und Mecklenburg-Vorpommerns. Ein frühzeitiges Erkennen von Gefahren und das rechtzeitige Verhindern eines möglichen Deichversagens sind demzufolge elementar, um einen zuverlässigen Küstenschutz zu ermöglichen.

Bestehende Frühwarnsysteme für Sturmfluten und Hochwasserereignisse berücksichtigen lediglich die Vorhersage von Wasserständen, während zusätzliche Belastungsgrößen wie Wind- und Wellenangriff sowie der Zustand der Hochwasserschutzanlagen selber nicht einfließen. Es ist jedoch bekannt, dass es infolge des zeitgleichen Eintretens mehrerer Belastungen oder durch Vorschädigungen des Bauwerks bereits vor Eintritt des Bemessungsereignisses zu einem frühzeitigen Versagen der Schutzanlagen kommen kann. Vor Gefährdungen infolge eines solchen Ereignisses kann derzeit nicht rechtzeitig gewarnt werden.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die BAW sammelt Erfahrungen und Kenntnisse, die eigene Geodateninfrastruktur effizienter zu gestalten, um die Nutzung ihrer Modellierungsergebnisse für Fragestellungen anderer Fachdisziplinen zu erleichtern. Die bestehende Marine Daten Infrastruktur MDI-DE wird um ein Risiko-Szenario von allgemeinem Interesse erweitert.

Es werden spezielle Standards der Sensorverarbeitung in die MDI-DE integriert, die Grundlagen für zukünftige Anwendungen aus dem Wasserbau bilden.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Frühwarnsysteme für Sturmfluten und Hochwasser basieren ausschließlich auf der Vorhersage von Wasserständen. Andere Belastungsgrößen (z.B. Wind, Wellen, Strömungen und Starkregen) sowie die Widerstandsfähigkeit der Schutzanlagen selber (z.B. Deiche, Hochwasserschutzmauern) werden nicht berücksichtigt. Dennoch kann es bereits vor Erreichen des Bemessungsereignisses aufgrund kaskadierender Effekte (z.B. zeitgleiches Eintreten mehrerer Belastungen) sowie des frühzeitigen Versagens der



Hochwasserschutzanlage selber (z.B. aufgrund lokaler Inhomogenitäten oder Vorschädigungen) zu einem Überflutungsereignis und damit zur Gefährdung kommen. Dieses Ereignis kann auf der Grundlage bestehender Frühwarnsysteme weder im Fluss- noch im Küstenbereich rechtzeitig erkannt werden. Daher ist es erforderlich, für Hochwasserschutzanlagen am Beispiel von Seedeichen ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem zu entwickeln, das alle relevanten Prozesse inklusiv kaskadierender Effekte berücksichtigt, eine rechtzeitige Warnung veranlasst und den Verantwortlichen zuverlässige und robuste Echtzeit-Daten zur Verfügung stellt.

## 2 Untersuchungsmethoden

Die Rolle der BAW konzentriert sich auf die Verknüpfung der Sensor- und Geodateninfrastruktur (SGDI) mit der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland (MDI-DE) zur Schaffung von Synergien. In diesem Zuge müssen die Anforderungen an die SGDI zur Integration in die MDI-DE sowie umgekehrt Schnittstellen der MDI-DE zur Anbindung der SGDI definiert werden, um eine Kompatibilität zwischen den beiden Fachportalen herzustellen. Dazu wird die BAW bereits die zu Beginn des Projektes vorgesehene allgemeine EarlyDike-Anforderungsanalyse mit allen Projektbeteiligten unterstützen und eine weitere spezielle Anforderungsanalyse für die SGDI federführend durchführen. Neben der Einbindung der SGDI-Karten- und -Datendienste (Web Mapping Service, Web Feature Service) gilt es insbesondere Anpassungen im MDI-Portal für die Integration von Sensordiensten vorzunehmen. Dies umfasst eine Erweiterung der Visualisierungs- und Download-möglichkeiten und die Herstellung der Kompatibilität mit Metadaten aus Sensordiensten. Nach einer entsprechenden Testphase ist es möglich, existierende Datensätze aus anderen Quellen mit den Informationen aus EarlyDike zu verschneiden, um neue Kartenprodukte zu erstellen oder Daten für ganzheitliche Analysen (z.B. Frühwarnung) bereitzustellen.

## 3 Ergebnisse

Im Rahmen des Projektverbundes EarlyDike – Sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche wurden im Jahre 2015 nachfolgend genannte wissenschaftlich-technische Ergebnisse veröffentlicht bzw. folgende wesentliche Ereignisse fanden statt:

- Das erste Kick-Off Statusseminar des Verbundprojekts fand am 3. und 4. Juli 2015 in Aachen statt. Alle projektbeteiligten Institutionen nahmen teil.
- Beim Kick-Off Seminar Frühwarnsysteme am 19. Oktober 2015 in Hannover wurde das Verbundprojekt vorgestellt.
- Die Projektwebpage [www.earlydike.de](http://www.earlydike.de) ist seit dem 2. November 2015 aufrufbar.

## 4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Arbeiten zur „Nutzung der Marinen Dateninfrastruktur Deutschland zur Kommunikation“ werden ab Mai 2016 beginnen.

Das Vorhaben wird im Zeitraum 01.06.2015 bis 31.05.2018 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderprogramms GEOTECHNOLOGIEN unter dem Themenschwerpunkt „Frühwarnsysteme“ gefördert. Es wird zusammen bearbeitet von RWTH Aachen, Universität Siegen, TU Hamburg Harburg, Naue Fasertechnik Espelkamp, Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg.

Das Arbeitsprogramm des Forschungsverbundes gliedert sich in 5 Arbeitspakete

- AP1 Sturmflutmonitoring und Sturmflutsimulator
- AP2 Wellenmonitoring und Wellenbelastungssimulator
- AP3 Deichmonitoring und Deichsimulator
- AP4 Überflutungssimulator
- AP5 Sensor- und Geodateninfrastruktur

Die BAW ist maßgeblich an AP5 beteiligt.

Laufzeit des Vorhabens: 2015 bis 2018.

## 5 Literatur

-/-

## 6 Veröffentlichungen

-/-